

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Talotekniikan koulutusohjelma

Ville Ratilainen

OMAKOTITALON MAKUUHUONEEN ILMANVAIHDON JA HIILIDI-
OKSIDILÄHTEEN CFD-MALLINNUS SEKÄ PÄÄTELAITTEEN SI-
JAINNIN OPTIMOINTI

Opinnäytetyö
Maaliskuu 2018



OPINNÄYTETYÖ
Maaliskuu 2018
Talotekniikan koulutusohjelma

Tikkarinne 9
80220 JOENSUU
+358 13 260 600 (vaihe)

Tekijä
Ville Ratilainen

Nimeke
Omakotitalon makuuhuoneen ilmanvaihdon ja hiilidioksidilähteen CFD-mallinnus sekä päätelaitteen sijainnin optimointi

Toimeksiantaja
Karelia-amk

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, voiko ilmanvaihtoa CFD-mallintaa omakotitalon makuuhuoneessa ja tutkia, kuinka luotettava malli on. Lopuksi tutkittiin, voiko päätelaitteen paikkaa optimoida siten, että hiilidioksidipitoisuus ja ilmapirrat olisivat mahdollisimman käyttäjäystävälliset. Mallinnus suoritettiin jo olemassa olevasta makuuhuoneesta, josta voitiin tehdä tarvittavat hiilidioksidi- ja savukoemittaukset mallin realistisuuden varmentamiseksi.

Savukoetutkimukset ja simuloidut ilmapirtaukset osoittivat, että ilmapirtoja voidaan mallintaa makuuhuoneessa suhteellisen tarkasti ja nopeasti. Yhdellä mittarilla suoritettut hiilidioksidimittaukset jättivät hieman arvailujen varaa, mutta yhteneväisyyksiä mallin ja mittausten välillä on havaittavissa.

Tutkimus osoitti, että jos mallien ja mahdollisten uusien mittausten perusteella hiilidioksidipitoisuuksien yhteneväisyydet varmennettaisiin, niin päätelaitteen paikka voidaan optimoida siten, että ilma vaihtuu paremmin ja huone huuhtoutuu hyvin. Malleista voidaan myös ennaltaehkäistä kriittisten paikkojen vedontunne seuraamalla ilmapirtauksien liikkeitä ja voimakkuutta.

Jatkotutkimuksia voisi suorittaa mallin realistisuuden varmentamiseksi uusilla hiilidioksidimittauksilla, jotka suoritettaisiin useammalla hiilidioksidimittarilla. Makuuhuoneesta voisi myös luoda tarkemman 3D-mallin, mutta se vaikeuttaisi radikaalisti laskentatapausta tiheimmän laskentaverkon takia.

Kieli
suomi

Sivuja 46
Liitteet 3
Liitesivumäärä 19

Asiasanat

Mallintaminen, Ilmanvaihto, Hiilidioksidi, Sisäilma



THESIS
March 2018
Degree Programme Building Services Engineering

Tikkarinne 9
80220 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author
Ville Ratilainen

Title
Airflow and Carbon Dioxide Modeling and Optimization of Supply Diffuser Location by CFD Modeling

Commissioned by
Karelia UAS

Abstract

The purpose of this thesis was to find out if CFD modeling could be made for a detached house ventilation and to measure how reliable the model is. Finally, the location of the supply air diffuser in the bedroom was optimized by Comsol Multiphysics. 3D-model was created from an existing bedroom where the necessary carbon dioxide and smoke measurements could be made to verify the model's realism.

The smoke tests and simulated airflows showed that airflows can be CFD modeled relatively precisely and quickly. The carbon dioxide measurements showed that there is consistency between the model and the real measurements but the results are not waterproof.

The study revealed that the model could be realistic but new carbon dioxide measurements have to be made to verify that the model is completely reliable. With those improvements the location of the supply air device could be optimized so that the air changes better. The models can also be used to prevent draft at critical spots by tracing the motion and intensity of the air flow.

To verify the model's realism, new measurements have to be made with multiple carbon dioxide meters at the same time. A more accurate 3D-model of the bedroom would improve the CFD accuracy but then the calculation mesh would be tighter, which would make it harder to solve.

Language
Finnish

Pages 46
Appendices 3
Pages of Appendices 19

Keywords
modeling, ventilation, carbon dioxide, indoor air

Sisältö

Peruskäsitteet	5
1 Johdanto	6
2 Computational fluid dynamics -mallinnus	7
2.1 Historia ja nykypäivä	7
3 Ilmanlaatu	8
3.1 Hiilidioksidi	9
3.2 Ilmanvaihto	10
4 Comsol Multiphysics	11
5 Tuloilmapäätelaitteen sijoitus	12
5.1 Määräykset ja velvoitteet	12
5.2 Suunnittelu ja sijoitusperiaatteet	13
6 Comsol-malli ja simuloinnin tulokset	15
6.1 Mallin luominen	15
6.2 Ilmavirtaukset ja hiilidioksidipitoisuudet	18
7 Huoneessa suoritettavat mittaukset	23
7.1 Savukoe	24
7.2 Hiilidioksidimittaus	27
7.3 Ilmamäärämittaus	31
8 Tulokset ja yhteenveto	33
8.1 Savukoe	33
8.2 Hiilidioksidimittaus	34
9 Päätelaitteen optimointi CFD-mallinnuksella	35
9.1 Sijainnit ja simulointien tulokset	35
9.2 Optimoinnin tulokset ja analyysi	37
10 Pohdinta	42
Lähteet	45

Liitteet

Liite 1	Mallin luominen Comsol Multiphysics -ohjelmistolla
Liite 2	Hiilidioksidimittarin käyttö ja tuloksien taltiointi
Liite 3	Simulointi tulokset päätelaitteiden optimoinnista

Peruskäsitteet

CFD-mallinnus	Computational Fluid Dynamics eli numeerinen virtausdynamiiikkamallinnus
Comsol Multiphysics	Simulointiohjelma, jolla voidaan suorittaa erilaisten fysikaalisien ongelmien mallinnuksia
Fluidit	Esim. nestemäisiä tai kaasumaisia aineita
MET	Metabolinen ekvivalentti eli lepoaineenvaihdunnan kerannainen
Ovirako	Oven alapinnassa oleva n. 2 cm:n korkuinen rako, jota käytetään siirtoilmareittinä
PPM	Parts per million, eli suhdeluku 1/1 000 000
Päätelaite	Ilmanvaihtokanavan säätölaite, joka näkyy käyttäjälle
Swema 3000	Ilmamäärämittari
Trotec BZ30	Tiedonkeruulaite, jolla voi mitata hiilidioksidipitoisuuksia ppm-yksikössä

1 Johdanto

Omakotitalojen ilmanvaihdossa voi olla ongelmana se, ettei käyttäjä koe ilmanvaihtoa riittävänä. Tähän osasyynä on päätelaitteiden sijoittelu, tuloilman suuntaus, huoneen kuormitus ja ilmamäärien vähäisyys tai esimerkiksi tuloilman heikko laatu. Tässä opinnäytetyössä keskityttiin siihen, kuinka CFD-mallinnuksella voidaan ilmanvaihtoa ja hiilidioksidin tuottoa mallintaa ja voidaanko tuloilmapäätelaitteen sijainti optimoida omakotitalon makuuhuoneessa siten, että hiilidioksidipitoisuus olisi käyttäjäystävällisin. Mallinnettavana kohteena käytettiin vuonna 1995 rakennettua omakotitalon makuuhuonetta, josta voitiin varmistaa mallin realistisuus suorittamalla savukokeita ja muita tarvittavia mittauksia.

Huoneen hiilidioksidipitoisuuksia seurattiin viidestä eri mittauspisteissä, joita verrattiin mallin arvoihin. Lopuksi mallinnettavan kohteen tuloilmapäätelaitteen paikka pyrittiin optimoimaan Comsol Multiphysics -ohjelmistolla siten, että se olisi käyttäjälle ilmanlaadullisesti paras vaihtoehto ja pohdittiin, voiko tätä hyödyntää suunnittelussa parempien ilmanvaihtoratkaisujen toivossa. Työn tuloksena syntyi mallinnuksesta peruskehikko, jota voidaan jatkossa hyödyntää mallin pohjaratkaisua ja asetusarvoja muokkaamalla. Karkea 3D-malli makuuhuoneesta luotiin Comsol Multiphysics -ohjelmistolla, johon mallinnettiin makuuhuoneen kalusteet ja muut ilman tai hiilidioksidin liikkumiseen vaikuttavat esineet. Malliin ei otettu huomioon hengityksestä tai lämmityksestä koituvia lämpötilanmuutoksia. Malliin lisättiin hiilidioksidin lähde simuloimaan ihmisen uloshengityksestä johtuvaa hiilidioksidin tuottoa.

Tietolähteinä opinnäytetyössä käytettiin CFD-mallinnuksen apuna Comsol.com-sivustoilta löytyviä avoimeen tietolähteeseen perustuvaa materiaalia, opastusvideoita ja webinaareja sekä jo olemassa olevia opinnäytetöitä tai muita tutkimuksia. Ilmavirtojen ja hiilidioksidin tarkkailuun vaativia ohjeita ja numeerisia raja-arvoja löytyy rakentamismääräyskokoelmasta, RT-kortistosta sekä luotettavista alaan liittyvistä nettisivustoista.

2 Computational fluid dynamics -mallinnus

Computational fluid dynamics –mallinnuksella voidaan Navier-Stokes tai Euler yhtälöillä laskennallisesti simuloida erilaisten fluidien virtausdynamiikkaa. Fluidit ovat aineita joiden rakenneosat voivat liikkua vapaasti toisiinsa nähden. Näitä ovat muun muassa nesteet ja kaasut. Fluidien liikkumiseen vaikuttavat esimerkiksi aineen viskositeetti, lämpötila ja esimerkiksi nopeudesta johtuva aineen virtaustyyppi.

CFD-mallinnusta käytetään nykypäivänä yleisesti fysikaalisten, kemiallisten ja esimerkiksi mekaanisten rasitteiden yhteisvaikutuksen seuraamiseen fluideissa. Kyseistä mallinnustekniikkaa voidaan hyödyntää vaikka tuotekehittelyssä siten, ettei jokaista eri tuoteprototyyppiä luoda fyysisesti vaan sen ominaisuudet testataan etukäteen tietokonemallilla, jonka jälkeen parhaimmaksi todetut otetaan tuotantoon.

Tällaisesta mallintamisesta hyötyvät useat erilaiset tekniikan alalla työskentelevät toimijat, joiden täytyy ymmärtää tuotteidensa ominaisuudet tai joiden täytyy ratkaista jokin virtaustekninen ongelma. Realistisesti mallinnetuilla tapauksilla voidaan säästää niin ajassa, kuin rahallisesti riippuen ongelman koosta ja laadusta. Lisäksi CFD-mallinnusta hyödynnetään paljon opetustilanteissa, jotta oppilaat ymmärtäisivät fysikaalisia ilmiöitä paremmin.

2.1 Historia ja nykypäivä

CFD-mallinnuksen voidaan katsoa syntyneen jo 1687-luvulla, jolloin Isaac Newtonin julkaisi kirjan "Principia", jossa esiteltiin nesteiden viskositeetin vaikutus sen liikkuvuuteen. Aiheesta kiinnostuneena Daniel Bernoulli vuonna 1738 ja Leonhard Euler vuonna 1755 ratkaisivat ensimmäisen fluidien liikkeitä kuvaavan matemaattisen yhtälön, jota kutsutaan Eulerin yhtälöiksi. Eulerin – yhtälössä ei kuitenkaan ole huomioitu nesteiden viskositeettiä ja lämmönjohtavuutta, joten vuoteen 1822 asti Claude-Louis Navier teki tutkimuksia osittaisdifferentiaalis osuudesta, jonka jälkeen vuonna 1845 George Gabriel Stokes ratkaisi lopullisen

yhtälön, jossa nämä muuttujat on huomioitu [1; 2.] Tätä kutsutaan nykyisin Navierin-Stokesin yhtälöiksi, joita käytetään CFD-malleista edelleen.

Ensimmäiset 2-ulotteiset virtausmallit, joita sovellettiin teollisuuden käyttöön, on luotu 1929, jolloin L. Prandtl ja A. Busemann laskivat paperille käsin ylisoonisen tuulitunnelin suutinvirtauksen [3]. Vasta 1940-luvun lopulla sitä alettiin käyttämään yleisesti teollisuuden ongelmien analysointiin [4]. 1950-luvulla CFD-mallinnustekniikkaa käytettiin varsinkin lentokoneiden aerodynamiikan parantamiseen ja esimerkiksi 1960-luvulla avaruussukkuloiden suunnittelussa [5, s. 3]. Ensimmäinen merkittävä tietokoneella tehty CFD-mallinnus on suoritettu Massachusettsissa alkeellisella tietokoneella 1947, jolloin Z. Kopal ratkaisi numeerisesti kartiomallisen objektin ilmapvirtauksien liikkeitä ylisoonisessa virtauksessa [5, s. 6]. Vuonna 1967 julkaistiin ensimmäinen tieteellinen lehti, jossa käsiteltiin kolmiulotteisessa ympäristössä k -epsilon mallintamistekniikkaa [1]. Siitä lähtien CFD-mallinnus on ollut teollisuuden ahkerassa käytössä.

Nykyisin CFD-mallinnus ei ole pelkästään Navier-Stokes yhtälöiden ratkaisua kaksiulotteisessa mallissa, vaan simulointi voidaan suorittaa 0-3-ulotteisena mallina ja ottaa mukaan erilaisia muuttujia, vaikkapa liikkuvia kiinteitä tai nestemäisiä objekteja, isoja ja tarkkoja 3D-malleja ja lämmön vaikutus fluidien liikkeisiin. Comsol Multiphysics –ohjelmassa voidaan nimensä mukaisesti ottaa huomioon muun muassa CFD-simuloinnin lisäksi, esimerkiksi sähköön vaikutus, akustiikka, lämmönjohtavuus ja erilaiset kemialliset reaktiot. Näiden yhteisvaikutuksen aiheuttamia reaktioita voidaan seurata minkä tahansa malliin asetetun muuttujan mukaan.

3 Ilmanlaatu

Ilmanlaadun mittareita on useita, joista yleisimmät ovat typpidioksidi-, rikkidioksidi- ja esimerkiksi otsonipitoisuus. Muita ilmanlaatuun vaikuttavia tekijöitä ovat erilaiset hiukkaset, pienhiukkaset ja monet haisevat rikkiyhdisteet, joita syntyy lähinnä liikenteen, teollisuuden ja energiantuotannon seurauksena. Kuitenkin

huoneistoilmanlaadun tärkeimpiä mittareita on hiilidioksidipitoisuus, suhteellinen ilmankosteus ja erilaiset epäpuhtaudet esimerkiksi homeet tai muut hajut.

3.1 Hiilidioksidi

Co₂ on hiilestä ja hapesta koostuva yhdiste, jonka pitoisuutta ilmakehässä mitataan ppm (parts per million) -yksikössä. Vuoden 2017 huhtikuussa ulkoilman hiilidioksidipitoisuus oli noin 410 ppm ja sen keskimääräinen pitoisuus kasvaa noin 2 ppm vuodessa [6; 7]. Korkeat ja nousevat ilmakehän hiilidioksidipitoisuudet johtuvat ihmisten tuottamasta hiilidioksidin määrästä, koska sitä poistavat tekijät eli kasvillisuus ei pysty sitomaan tuotettua hiilidioksidia riittävästi. Tästä johtuen ilmakehän hiilidioksidipitoisuus kasvaa, kasvihuoneilmiö pahenee ja ilmastonmuutos jatkaa syöksykierrettään. Korkeat hiilidioksidipitoisuudet huoneilmassa aiheuttavat tunkkaisuuden tunnetta, väsymystä, päänsärkyä ja mahdollisesti keskittymisvaikeuksia. Ihminen tuottaa nukkuessa 0,8-0,9 Metabolisella ekvivalenilla noin kaksi desilitraa hiilidioksidia minuutissa [8; 9].

Asumisterveysasetuksen 8. §:n mukaan sisäilman hiilidioksidipitoisuuden toimenpideraja ylittyy silloin, jos pitoisuus on 1150 ppm suurempi kuin ulkoilman hiilidioksidipitoisuus [10]. Tämä tarkoittaa sitä, että keskimääräisesti 1550 ppm on maksimi hiilidioksidipitoisuus huoneilmassa, ennen kuin korjaustoimenpiteisiin on ryhdyttävä. Uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdesta asetettu ympäristöministeriön asetus määrittelee uudisrakennuksen hetkellisen maksimi hiilidioksidipitoisuuden rajan 800 ppm suuremmaksi kuin ulkoilman hiilidioksidipitoisuus [11].

Sisäilmastoluokitus määrittelee hiilidioksidipitoisuudet siten, että S1 luokassa raja-arvo on 700 ppm, S2:ssa 900 ppm ja S3:ssa 1200 ppm [7; 12]. Sisäilmastoluokitus 2017 luonnos, jota odotellaan virallisesti julkaistavaksi kevään 2018 aikana määrittelee hiilidioksidipitoisuuksien raja-arvot tiukoiksi. Sisäilmastoluokka S1 <350 ppm, S2 <550 ppm ja S3 <800 ppm [13].

3.2 Ilmanvaihto

Toimivan ilmanvaihdon merkitys on sisäilmanlaadun kannalta merkittävin tekijä, joten sillä turvataan, että käyttäjällä on aina saatavilla puhdasta ja raikasta hengitysilmaa. Ilmanvaihdon toimivuus on varmistettava asianmukaisilla suunnitelmilla, asennuksilla ja valvonnalla.

Uudisrakennuksissa pääsääntöisesti on käytetty koneellista ilmanvaihtoa, eli rakennukseen luodaan järjestelmä, jolla ilma saadaan liikutettua keinotekoisesti. Tällä tavalla ilmanvaihtokanavien koko saadaan pienemmäksi ja ilmamäärät suuremmiksi, mutta varsinkin vanhemmissa rakennuksissa on suosittu painovoimaista ilmanvaihtoa. Sen toiminta perustuu ulko- ja sisäilman lämpötilaeroihin ja luonnonilmiöiden, kuten kovasta tuulesta johtuvan sisäilman liikkumiseen. Painovoimaisen ilmanvaihdon kanavien tulee olla väljät ja yksinkertaiset, sekä päätelaitteiden painehäviöttömiä, jotta ilma voisi liikkua mahdollisimman helposti.

Ilmanvaihdon perusperiaatteet ovat, että raikas tuloilma johdetaan kaikkiin oleskelutiloihin, kuten makuu- ja olohuoneisiin ja likainen poistoilma poistetaan likaisemmista tiloista, kuten pesuhuone, wc ja keittiö. Painovoimainen ilmanvaihto toimii vaihtelevasti, koska se on hyvin altis lämpötilanvaihteluille ja muille luonnonilmiöille. Koneellisen ilmanvaihdon etuja on, että ilmanlaatu pysyy suhteellisen tasaisena ja sitä voidaan säädellä. Ilmanvaihtokonetta ei kuitenkaan saa missään tapauksessa sammuttaa, koska sitä ei ole suunniteltu toimimaan ilman keinotekoista ilman liikuttajaa.

Ilmanvaihdon riittämättömyyden yleisimmät ongelmat liittyvät siirtoilmareittien olemattomuuteen tai ilmamäärien vähäisyyteen huoneen kuormitukseen nähden. Päätelaitteen paikoilla voidaan parantaa ja tehostaa ilmanvaihdon toimivuutta, mikäli perustiedot huoneistosta on tiedossa. Rakenteellisesti halpoihin siirtoilmareittiratkaisuihin kuuluu muun muassa välioviin jätettävä ovirako. Se on oven alapinnasta noin 2 cm:n korkuinen rako, jonka kautta likainen ilma siirtyy kohti poistoilmapäätelaitetta. Mikäli oveen halutaan jättää kynnyks voi siirtoilmareitin korvaaja olla myös samassa huoneessa sijaitseva poistoilmapäätelaitte. Tällöin koneellinen ilmanvaihto imee epäpuhtaudet pois huoneilmasta.

4 Comsol Multiphysics

Ensimmäinen Comsol Multiphysics 1.0 ohjelmisto on julkaistu 1. syyskuuta vuonna 1998 erityisesti mekaanisen fysiikan ilmiöiden simulointiin. Ohjelmoijat ovat kuitenkin vuosien saatossa julkaisseet useita erilaisia laajennoksia, joita voi hyödyntää muihinkin käyttötarkoitukseen soveltuviin ongelmiin [14]. Näihin laajennuksiin lukeutuu muun muassa työssä käytettävä CFD-moduuli, joka on julkaistu 18. heinäkuuta 2010. Opinnäytetyössä on käytetty Comsol-ohjelmiston uusinta 5.3a-versiota, ja se on julkaistu 14. joulukuuta 2017.

CFD-mallinnuksella voidaan simuloida nimensä mukaisesti nesteiden liikkumista, mutta tällä on myös mallinnettu ilmavirtojen käyttäytymistä [15]. Comsol Multiphysics –ohjelmistolla voidaan samanaikaisesti simuloida usean erilaisen muuttujan yhteisvaikutusta ja analysoida mallista saatuja tuloksia [16]. Comsol-ohjelmistolla voidaan mallintaa esimerkiksi tuloilmavirta päätelaitteesta ja simuloida ihminen tuottamaan hiilidioksidia huoneeseen.

Realistisen mallin luomiseen tarvitaan käyttötarkoitukseen sopiva simulointimalli, johon sisältyy oikeat asetusarvot, sekä kolmiulotteinen malli huoneesta. Jotta laskentaverkko ei menisi liian monimutkaiseksi, luodaan ohjelmaan pelkistetty huone, jossa on huomioitu mittausten aikana huoneessa olevat muuttujat. Näihin lukeutuvat huoneessa sijaitsevat huonekalut ja kiintokalusteet, sekä ilmanvaihdon päätelaite ja ovirako. Mallissa tulee olla myös määriteltynä oikeassa mittasuhteessa olevat muuttujat esimerkiksi ilman viskositeetti, hiilidioksidimäärä sekä tuloilmavirta.

Comsol-ohjelmiston vahvuus on sen mukautettavuus. Käyttäjä voi muokata kaikkia syötettäviä arvoja ja seurata mallien tuloksia monipuolisesti. Monet kilpailevat tuotteet rajoittavat vahvasti käyttäjän määrittelemiä arvoja. Muokattavuus tuo myös ongelmia, mikäli ohjelman tai syötettyjen lukujen tarkoitusta ei tiedosta.

5 Tuloilmapäätelaitteen sijoitus

5.1 Määräykset ja velvoitteet

Ympäristöministeriön asetuksessa uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta määrätään selkeästi, millä kriteereillä ilmanvaihto tulisi toteuttaa. Ilmanvaihto on suunniteltava siten, ettei epäpuhtaudet kuten liiallinen kosteus ja erilaiset hajut jäävät huoneilmaan ja tällöin taataan terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilman laatu oleskelutiloissa [17]. Ulkoilmavirraksi on mitoitettava käyttöajalle vähintään $6 \text{ dm}^3/\text{s}$ henkilöä kohti, mutta kuitenkin vähintään $0,35 (\text{dm}^3/\text{s})/\text{m}^2$ asunnon pinta-alan perusteella tai vähintään $18 \text{ dm}^3/\text{s}$.

Rakennuksen ilmanvaihto on suunniteltava siten, että tuloilma tuodaan niin saottuihin puhtaisiin tiloihin ja se poistetaan likaisista tiloista. Puhtaisiin tiloihin luokitellaan kaikki oleskelutilaksi suunnitellut tilat ja likaisiin tiloihin sellaiset, joissa syntyy kosteutta, höyryjä tai epämiellyttäviä hajuja. Epäpuhtaudet suunnataan kohti poistoilmapäätelaitetta, kuitenkin niin että oleskelutila huuhtoutuu epäpuhtauksista kokonaan. Tämä tarkoittaa sitä, että päätelaitteiden valinnalla ja sijoittelulla voidaan parantaa ilmanvaihtoa ja kontrolloida sisäilmanlaatua. Päätelaite kuitenkin tulee sijoitella ja suunnitella siten, ettei käyttäjälle tule oleskeluvyöhykkeellä vedontunnetta. Tätä ehkäistään myös ilman nopeudella, joka on rajoitettava asumisterveysasetuksen kaavion 1 mukaan. Esimerkiksi 20 celsiuksen lämpötilassa suurin sallittu ilman nopeus huonetilassa on $0,2 \text{ m/s}$ [10].

Vanhassa rakennusmääräyskokoelma D2:ssa määritellään huoneisiin suositellut ilmamäärät ja maksimiäänitasot. Ne yhdessä ratkaisevat kuinka suuri päätelaitteen ja ilmanvaihtokanavan tulee olla [5]. Ilmanvaihdosta johtuvaa äänitasoa voidaan pienentää järjestelmän rakennevalinnoilla, kuten äänenvaimentimilla, kanavakoolla ja päätelaitteen asennukseen käytettävillä haaroilla. Päätelaitteesta kuluuvaa huminaa voidaan hiljentää tasapainotuksella. Liiksi kuristettu päätelaite tuottaa useita desibelejä korkeamman melun ja se kuormittaa ilmanvaihtokoneetta.

5.2 Suunnittelu ja sijoitusperiaatteet

Suunnittelija pyrkii sijoittamaan päätelaitteen mahdollisimman hyvin kaikki määräykset huomioon ottaen. Hänen tulee ottaa huomioon myös kustannukset, rakennuksen rakenteet sekä tulevien huoltotoimenpiteiden vaatimat kriteerit. Jokaisella suunnittelijalla on omat suunnitteluperiaatteet, joita he noudattavat eikä yhtä ja oikeaa sijoitustapaa välttämättä ole. KTS-mallinen päätelaite sijoitetaan omakotitalon makuuhuoneessa yleensä oven yläpuolelle, ikkunan yläpuolelle, nurkkiin tai keskelle huonetta. Vanhemmissa rakennuksissa kattotuolit on rakennettu siten, ettei tarvittavaa asennustilaa ole jätetty juuri ollenkaan. Tästä johtuen päätelaitteiden sijainnit ovat olleet keskeimmällä huonetta tai ilmanvaihtokanavat ovat rakennettu liian ahtaiksi tilanpuutteen vuoksi. Liian pienillä kanavilla rakennettu ilmanvaihtojärjestelmä on kovaääninen ja kanavistossa syntyy mittavia painehäviöitä, jolloin ilmanvaihtokoneen täytyy tehdä enemmän työtä, jotta ilma saadaan vaihtumaan.

Ilmanvaihdon mitoituksen perusteet -hankkeen loppuraportti 2018 kohdassa 5 ”ohjeita ilmanvaihtojärjestelmän suunnitteluun” [18] annetaan selkeä ohje siitä, kuinka tuloilmapäätelaite tulisi sijoittaa makuuhuoneessa. Raportin mukaan makuuhuoneissa päätelaite tulisi sijoittaa siten, että se olisi todennäköisen sängyn sijainnin mukaan päätyseinää vasten. Tämä tarkoittaa sitä, että päätelaite tulisi sijoittaa suoraan sängyn yläpuolelle. Raportissa ohjeistetaan, että huoneen likaisen ilman poiston voi toteuttaa siirtoilmareitein, mutta äänieristyksen takia suositellaan samaan huoneeseen poistoilmapäätelaitetta. Normaalikokoinen ovirako toimii siirtoilmareittinä jopa 18 dm³:iin/s asti.

Ikkunan yläpuolelle sijoitetun päätelaitteen periaate on, että suuntauslevyllä tuloilmaa pyritään sekoittamaan ikkunaan päin, jolloin ikkunasta johtuva kylmä ilma lähtee liikkeelle ja sekoittuu lämpimään ilmaan. Samalla se huuhtelee hyvin alapuolellaan olevat tilat, mutta jättää vastakkaisen seinän ja sen alueen hieman huonompaan huuhteluun. Tässä on vaarana, että ilma jää pyörimään tietyille alueille, ja huoneen huuhtoutuminen ei tapahdu täydellisesti.

Teoriassa oven yläpuolelle sijoitettu päätelaite ja ilmavirrat suunnattuna vastakkaiseen nurkkaan ilman pitäisi liikkua Coandă-ilmiötä ja päätelaitteen heittopituutta hyödyntämällä nurkkaan asti, josta se tippuu alas ja sitä kautta poistuu oviraosta. Tällä sijoitustavalla huuhdotaan koko huone, jos heittopituus riittää huoneen nurkkaan asti. Ilmamäärien riittämättömyyden vuoksi on mahdollista, ettei ilmavirta riitä tarpeeksi pitkälle. Huuhtoutumaton huonetila jää päätelaitteen alapuolelle, johon tulisi sijoittaa loppukäyttäjälle vähiten tarpeellinen työ- tai oleskelutila. Huoneiden sijoittelusta riippuen tällä tavalla voidaan myös minimoida putkimenekkiä etenkin sarjatuotantokohteissa.

Huoneen keskelle sijoitettu päätelaite voi aiheuttaa haasteita palovaroittimien tai kattovalon sijoittamiselle. Mikäli päätelaite joudutaan sijoittamaan keskelle huonetta, niin se voidaan asentaa ilman suuntauslevyä. Tällöin tuloilmaa tulee jokaiseen nurkkaan ja tippuu seinänviertä pitkin alas. Suoraan päätelaitteen alla oleva tila voi kuitenkin jäädä huuhtoutumatta, jolloin esimerkiksi työtasoa ei kannata asentaa tälle kohdalle.

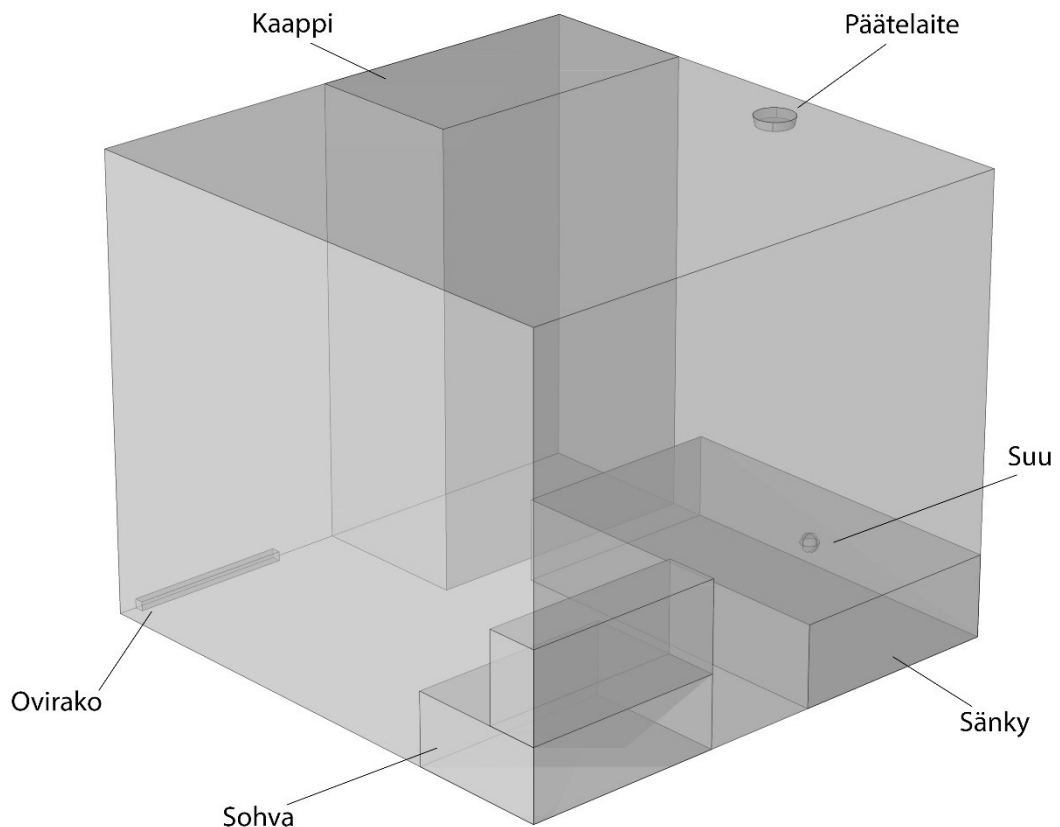
Huoneen nurkkiin asetetut päätelaitteet suuntauslevyt suunnattuna sänkyyn päin voivat olla ilman vaihtuvuuden kannalta erittäin hyvä vaihtoehto. Varsinkin sängyn yläpuolelle asetetussa päätelaitteessa ja ilmavirta suunnattuna ovesta katsottuna vastakkaiseen nurkkaan, voi ilman liikkuvuus olla jouhevaa, jolloin huoneen epäpuhtaudet poistuvat nopeasti. Kuitenkin liian lähelle oleskelutilaa tai tässä tapauksessa sänkyä sijoitetut päätelaitteet voivat aiheuttaa liiallista vedon tunnetta, jota pyritään välttämään jo suunnitteluvaiheessa.

6 Comsol-malli ja simuloinnin tulokset

6.1 Mallin luominen

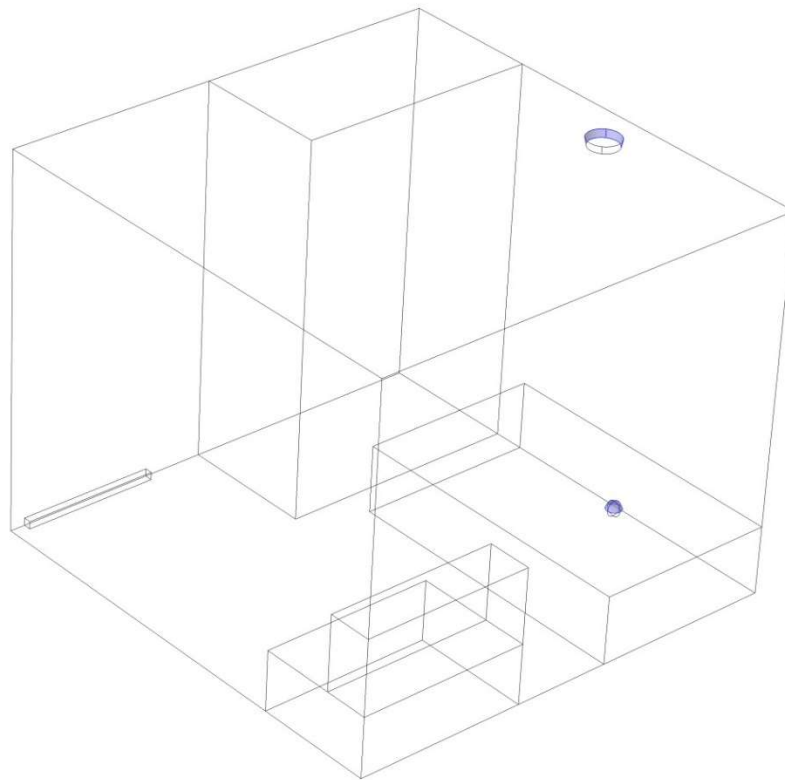
Mallinnettava kohde on 3 m x 3,1 m makuuhuone, jossa on 1,2 m x 2 m sänky, sekä 1,15 m leveä sohva. Nurkassa on kiinteä 0,9 m x 1,6 m kaappi ja korkeutta huoneella sekä kaapilla on 2,5 m. Ovea kuvastaa 1 cm korkuinen ovirako, joka on 0,9 m leveä. Päätelaitteen perusmallina on käytetty perinteistä KTS-100 venttiiliä, ja se on mallinnettu katkaistulla ympyräkartiolla, jonka korkeus on asetettu päätelaitteen asetusarvon mukaan 15 millimetriin.

Huoneen 3D-malli on luotu Comsol-ohjelman omalla Geometry-työkalulla yksinkertaisilla objekteilla, jotta laskentaverkko ei menisi liian monimutkaiseksi. Samasta syystä johtuen huonekalujen alapuolinen tila on jätetty umpinaiseksi.



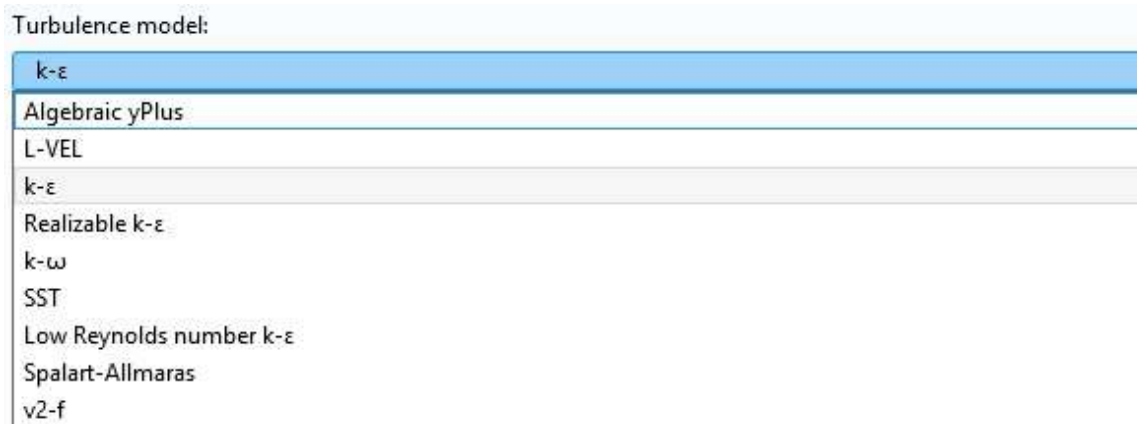
Kuva 1. 3D-malli makuuhuoneesta

Päätelaite on sijoitettuna sängyn yläpuolelle siten, että suuntauslevy on suunnattu 40 asteen kulmaan kaappiin päin. Kuvassa 2 on esitetty sinisellä värillä päätelaitteen tuloilman tulosuunta. Tuloilmavirraksi on mitattu hiilidioksidimittauksen jälkeen 2,6 l/s, vaikka tämän lukeman pitäisi olla uuden rakennusten sisäilmaston ja ilmanvaihtoasetuksen ja myös vanhan rakentamismääräyskokoelman D2 mukaan vähintään 6 l/s [17;19]. Comsoliin on syötettävä tuloilman arvo Inlet kilogrammoina sekunnissa eli 2,6 l/s on muunnettuna 0,00312 kg/s.



Kuva 2. Päätelaite ja suuntauslevy, sekä hiilidioksidilähde sängyllä

Hiilidioksidin lähteenä mallissa on käytetty palloa, jolla simuloidaan ihmisen hengitystä, joka tuottaa noin 2 dl/min hiilidioksidia. Pallosta on valittu katonpuoleinen puolikas tuottamaan hiilidioksidia $0,009358 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ voimakkuudella. Ilmatilan hiilidioksidipitoisuus määritellään ulkoilman mukaan, joka on noin 400 ppm. Muunnettuna se vastaa $0,017849 \text{ mol}/\text{m}^3$. Kuvassa 2 näkyvät sinisellä värillä pallossa hiilidioksidia tuottavat pinnat. 3D-mallin luontia ja syötettyjen arvojen laske- misesta käsitellään tarkemmin liitteessä 1.

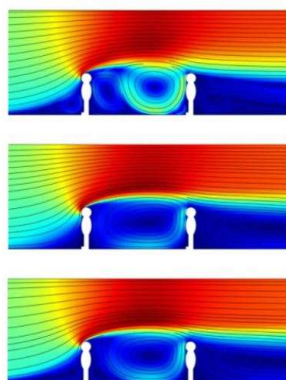


Kuva 3. Turbulenttivirtausmalleja

CFD-moduulin myötä Comsolissa on valittavana useita erilaisia turbulenttisia virtausmalleja, jotka toimivat parhaiten silloin, kun niitä käytetään käyttötarkoitukseensa soveltuvassa ongelmassa. Jokaisessa eri virtausmallissa on hieman erilaiset muuttujat, joita ohjelma pyrkii ratkaisemaan, joten mallien ratkaisemisen helpottamiseksi voidaan valita joko helposti ratkeavia ja suurpiirteisesti mallintavia, tai vaikeita, mutta tarkkoja virtausmalleja (kuva 3).

Tässä työssä käytettävä k-epsilon virtausmalli on hyvin yleisesti käytetty teollisuuden ongelmatapauksissa sen nopean ratkaisukyvyn ja vähäisen järjestelmävaatimusten takia. Kuvasta 4 nähdään, että K-epsilon malli ratkaisee suhteellisen tarkan virtaustuloksen, mutta mallintamiseen kuluu murto-osa tarkempien mallien ajasta [20].

Comparing Turbulence Models



Algebraic yPlus: 2 min 44 sec

k-epsilon: 9 min 13 sec

Low Reynolds k-epsilon: 32 min 16 sec

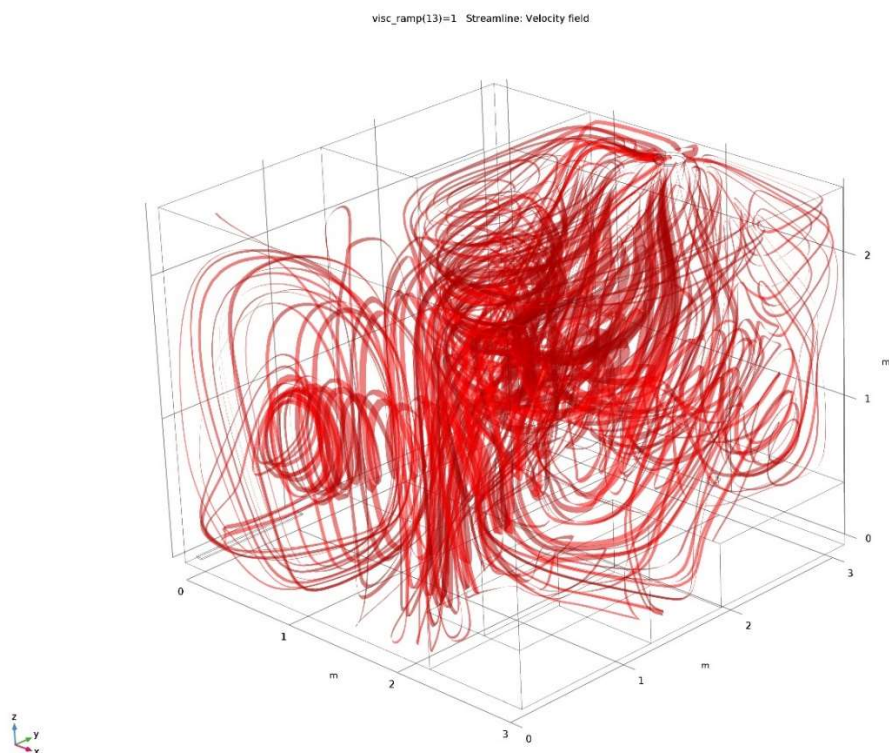
Kuva 4. Muutamien eri turbulenttimallien tuloksien ja laskentanopeuksien vertailu [21]

6.2 Ilmavirtaukset ja hiilidioksidipitoisuudet

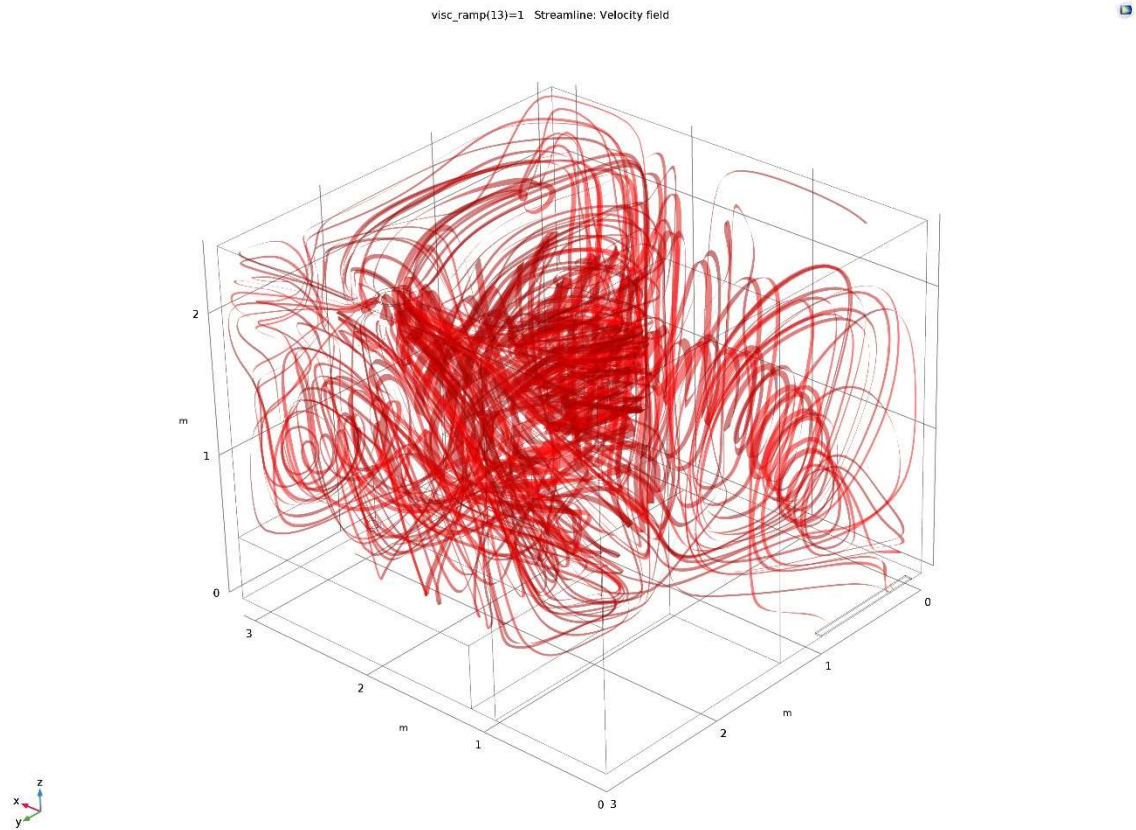
Comsol-ohjelmistosta saaduilla simulointituloksista näemme ilmavirtojen liikku-
misen ja niiden voimakkuuden piirretyn nauhan paksuudesta kuvista 5 ja 6. Hiili-
dioksidin sekoittumisen huoneilmaan näemme kuvasta 7. Tämä ei vastaa hiilidi-
oksidipitoisuuden määrää, vaan sitä kuinka se sekoittuu huonetilaan.

Kuvasta 5 näemme, että päätelaitteelta tuleva ilma muodostaa sängyn päälle
pyörteen, jonka jälkeen ilma liikkuu sohvanpuoleiseen nurkkaan. Tämän jälkeen
ilma nousee lattiapinnasta asti ylös kattoon ja virtaa takaisin päätelaitetta kohti.
Mallin mukaan ilma jää pyörimään kerta toisensa jälkeen huoneilmaan ja vain
pieni osa ilmavirrasta siirtyy vaikeuksien jälkeen ulos oviraosta (kuva 6).

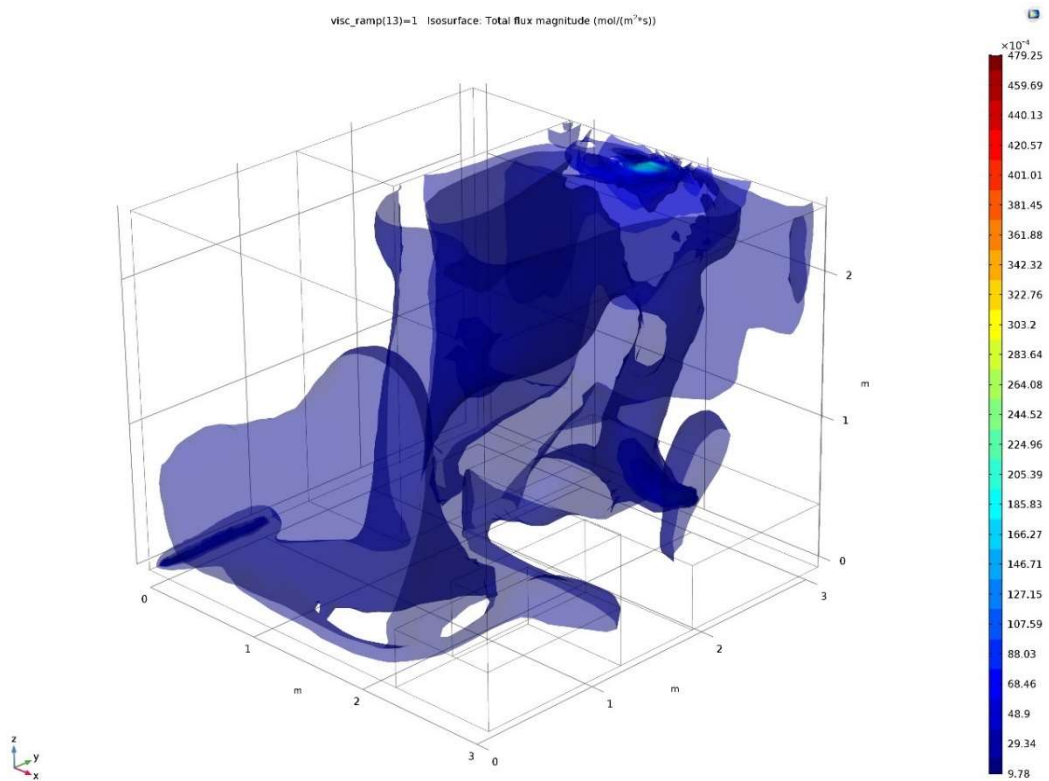
Hiilidioksidin sekoittuminen huoneilmaan keskittyy sängyn päälle ja kaapinpuo-
leiseen nurkkaan (kuva 7), mutta kuitenkin tasoittuu miltei joka puolelle huonetta.
Hiilidioksidin lähteestä nousee ”hiilidioksidipatsas” kohti kaappia, jonka jälkeen
se levittyy katon kautta kohti ovirakoa.



Kuva 5. Velocity-muuttujan liikkeet eli ilmavirtauksen suunta ja sen voimakkuus
sohvanpuoleisesta nurkasta



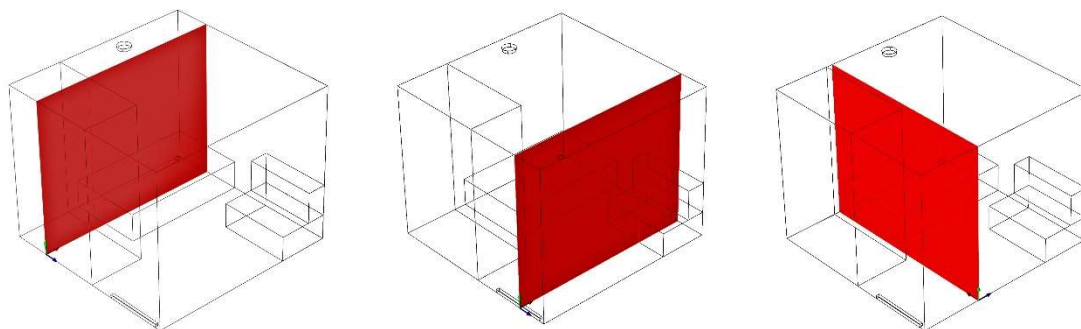
Kuva 6. Velocity-muuttujan liikkeit eli ilmapvirtauksen suunta ja sen voimakkuus kaapinpuoleisesta nurkasta



Kuva 7. Total flux magnitude, eli hiilidioksidin sekoittuminen hengitysilmaan

Luomalla 2D Plot Groupin voidaan mallista seurata keskeltä huonetta leikkauskuvana luomalla malliin Cut Plane (kuva 8), esimerkiksi ilmavirtojen suuntaa ja hiilidioksidin sekoittumista huonetilaan. Kuvissa 9, 10 ja 11 on nuolilla merkattu normalisoituna ilmavirtojen liikkeet ja taustalla "Concentration1 (mol/m3)"/44,6mol*1000000 eli kuvasta saadaan suoraan hiilidioksidipitoisuuden määrä ppm-yksikössä.

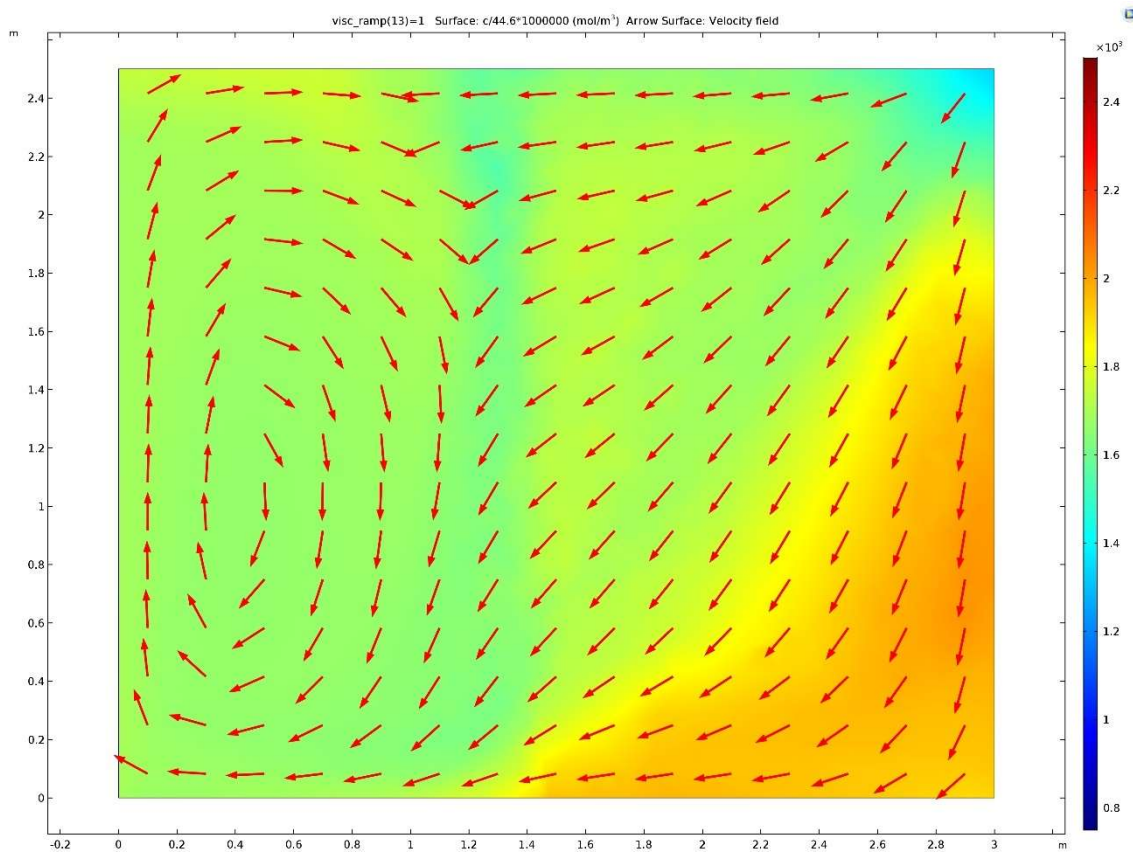
2D Plot Group – kuvista mallin hiilidioksidipitoisuudet on taltioitu Evaluation 2D – työkalulla, jolla voidaan valita mittauspiste hiirellä napauttamalla (kuva 12). Kuvan 12 taulukosta näemme X ja Y koordinaatit, sekä Value kohdassa mallista mitatut ppm arvot. Mittauspisteet ovat samat kuin makuuhuoneessa suorite-
tuissa mittauksissa (kuva 12). Laskennan tulokset ovat esitetty taulukossa 1. Suurin hiilidioksidipitoisuus on katossa sängyn yläpuolella, ja pienin kaapin ja sängyn välissä.



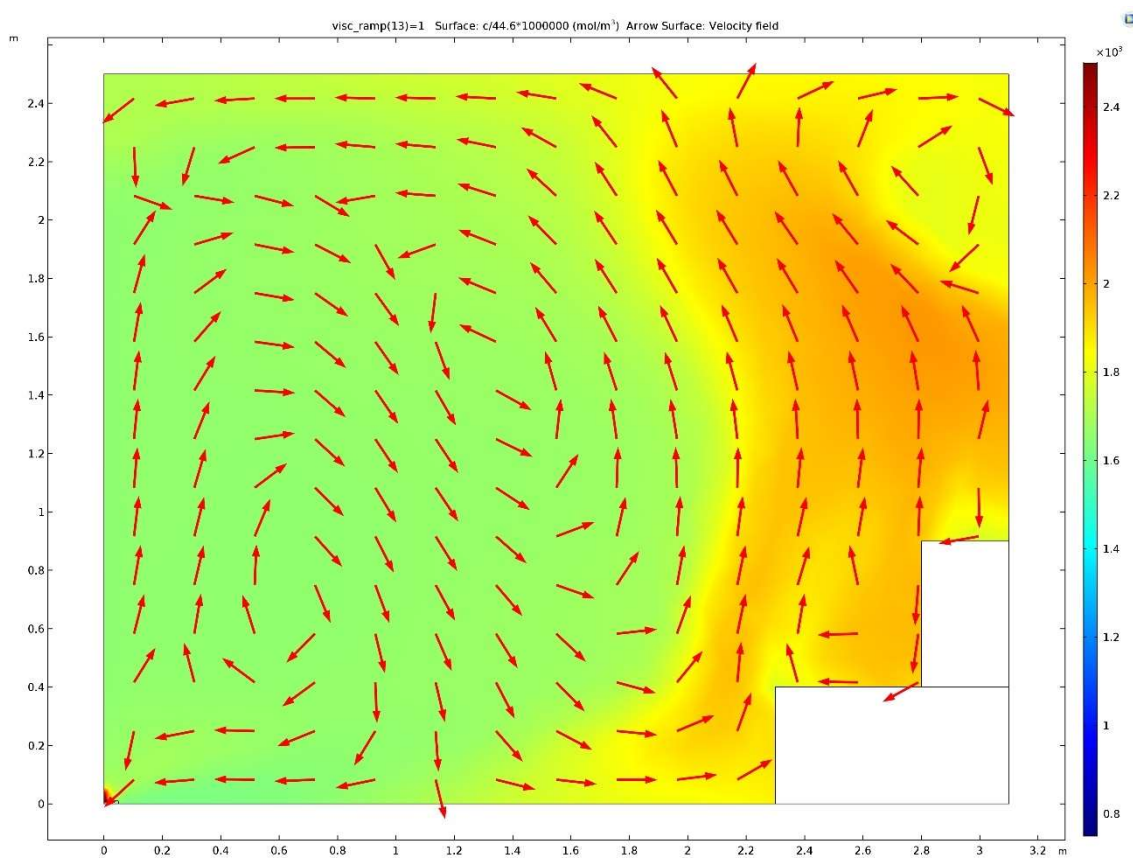
Kuva 8. Cut Plane – sijainnit joita 2D plot group esittää. Vasemmalla sängyn keskeltä kaappiin, keskellä oven keskeltä sohvalle ja oikealla kaapin ja sängyn väli

Taulukko 1. Comsolista mitattuja ppm-pitoisuuksia

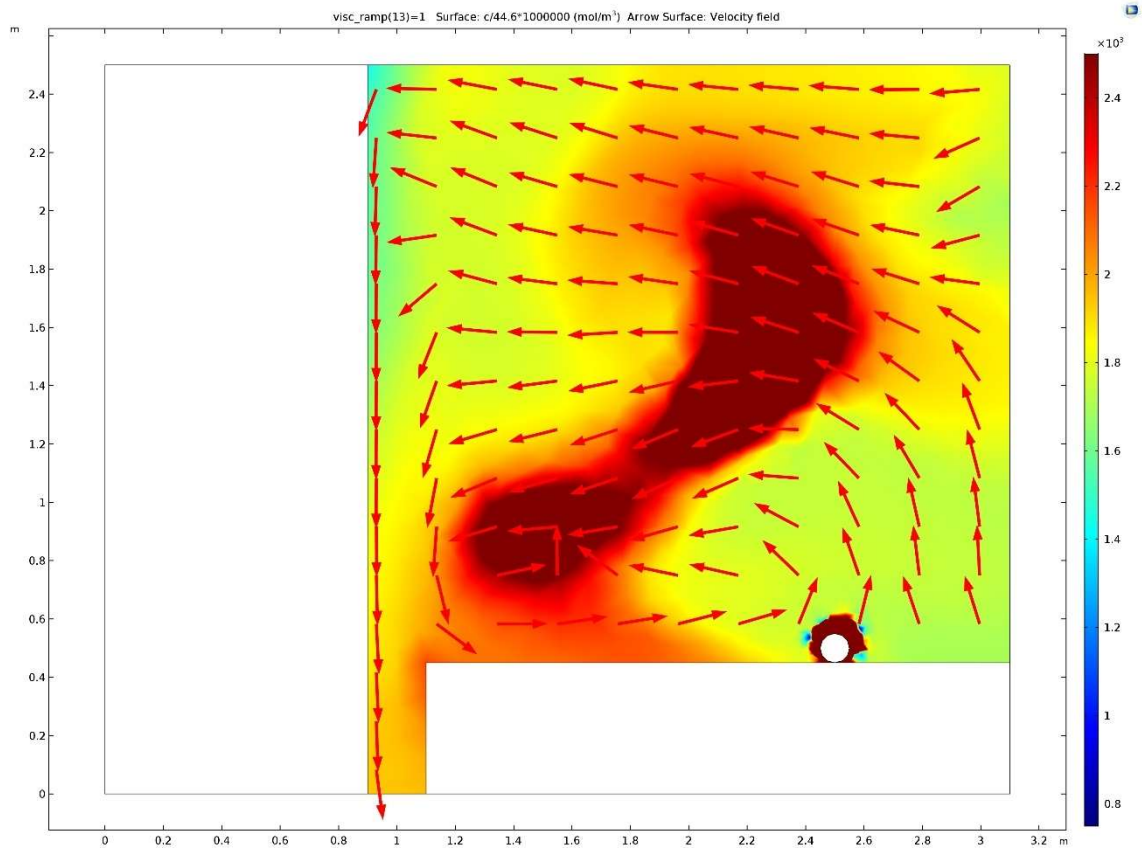
Mittauspaikka	Comsol-arvo
Kaapinpuoleinen lattia (mittauspiste A)	1931
Kaapinpuoleinen katto (mittauspiste B)	1649
Oven edessä (mittauspiste C)	1625
Sohvalla (mittauspiste D)	1928
Sängynpuoleinen nurkka (mittauspiste E)	1799



Kuva 9. 2D Plot Group kaapin ja sängyn välistä.



Kuva 10. 2D Plot Group oven keskeltä sohvalle

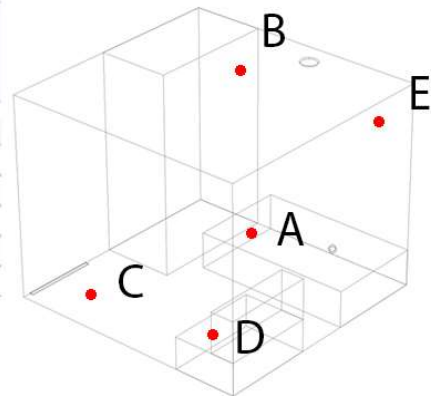


Kuva 11. 2D Plot Group kaapin keskeltä sängyn keskelle

Evaluation 2D

AUTO 8.5 e-1 850 e-3 0.85

x	y	Value	
2.5153300762176514	0.10809735953807831	1931.7119887866506	A
2.4713048934936523	2.039700984954834	1649.6903169901314	B
0.5126569271087646	0.06407220661640167	1625.942606297382	C
2.576336145401001	0.4823111891746521	1928.1667456003975	D
2.906525135040283	2.127751350402832	1799.4188932026823	E



Kuva 12. Evaluation 2D työkalulla hiilidioksidipitoisuudet ja mittauspisteet

7 Huoneessa suoritettavat mittaukset

Mallinnettavan huoneen ilmavirtojen ja hiilidioksidin käyttäytymisen tarkkailua varten suoritettiin tarvittavat mittaukset. Ilmanlaatua mittaavana muuttujana käytettiin hiilidioksidipitoisuutta, koska tämä on helposti mitattavissa, sekä suoraan verrannollinen hengitysilman laatuun. Savukoe suoritettiin kertakäyttöisellä savukoepullolla ja sillä pyrittiin todistamaan pelkästään ilman liikkeiden suuntaa ja sen yhdenmukaisuutta CFD-malliin.



Kuva 13. Mallinnettu makuuhuone, jossa mittaukset suoritettiin

Hiilidioksidipitoisuutta mitattiin Trotec BZ30 -tiedonkeruulaitteella (kuva 19), josta saatiin CO₂-arvo yksikössä ppm (parts per million). Hyvä hiilidioksidipitoisuus on 0-800, normaali 800-1200 ja huono yli 1200 ppm [22]. Laite mittaa myös lämpötilaa ja suhteellista ilmankosteutta, mutta ne eivät olleet relevantteja tässä työssä. Savukoe suoritettiin kertakäyttöisellä savukoepullolla. Koe videoitiin, joten jälkikäteen voitiin analysoida kokeen tuloksia, sekä verrata niitä CFD-mallista saatuihin tuloksiin.

Tuloilmanmäärä mitattiin Swema 3000 -ilmamäärämittarilla. Mittauksessa käytettiin DPF-mittaustekniikkaa, joka perustuu venttiilin säätöarvon mukaiseen k-arvon ja mittarilla suoritettavan paine-ero mittauksen väliseen laskennalliseen ilmapvirtaukseen.

7.1 Savukoe

Savukoe suoritettiin ruotsalaisvalmisteisella Regin -merkkisellä kertakäyttöisellä savukoepullolla, jonka säilyvyys on kaksi päivää pullon sisällä sijaitsevan ampullin rikkomisen jälkeen. Ampullissa on ilmaan reagoivaa syövyttävää ainetta, joka muuttuu savuksi.

Savukokeen tärkeimmät havaintopaikat on valittu CFD-mallista (kuva 5 ja 6). Ennen savukokeen suorittamista, on ilmavirtojen annettu tasaantua noin puolituntia, jotta mittaus olisi mahdollisimman todenmukainen. Mittausten aikana pyrittiin liikkumaan hitaasti ja hengittämään rauhallisesti ja tämänkin jälkeen oli pidettävä pieni tauko ennen tulosten taltioimista, jotta ilmavirrat tasautuisivat. Savukoe on videoitu ja ilmavirtojen liikkeet on taltioitu videoista kuvankaappauksilla.



Kuva 14. Sängyn päällä oleva pyörre



Kuva 15. Päätyseinän ilmavirta sohvapuoleisesta nurkasta sängynpuoleiseen nurkkaan



Kuva 16. Sohvanpuoleinen nurkka

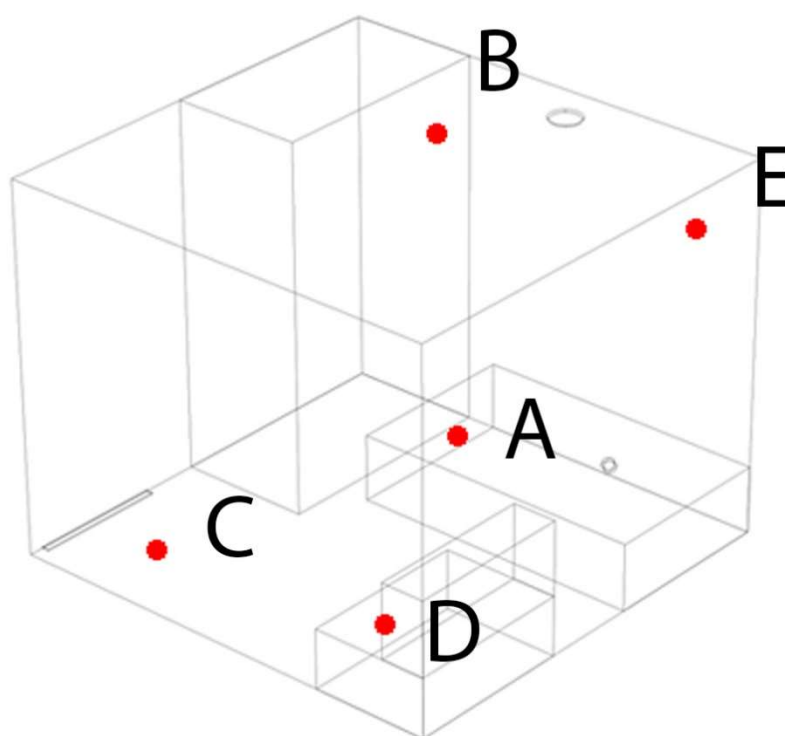


Kuva 17. Ovirako

7.2 Hiilidioksidimittaus

Hiilidioksidimittaukset suoritettiin viidestä eri pisteestä, mutta kuitenkin vain yhdellä mittarilla. Mittauspisteet olivat noin 30 cm katon rajasta sängyn yläpuolella, sekä samalla korkeudella kaapin puoleisessa katossa. Muita mittauspisteitä oli sohvan päällä nurkassa, sängyn ja kaapin välissä lattialla sekä oven edessä noin 15 cm irti lattiapinnasta (kuva 19).

Ensimmäinen mittaus suoritettiin katossa sängyn yläpuolella ja sen kesto oli 9 h 35 min. Tämän mittauksen avulla seurattiin, kuinka nopeasti hiilidioksidipitoisuus huoneessa tasaantui, jonka perusteella määrytyi muiden mittauksen kesto. Hiilidioksidipitoisuus tasaantui noin 3,5 tunnin kuluttua mittauksen aloittamisesta.



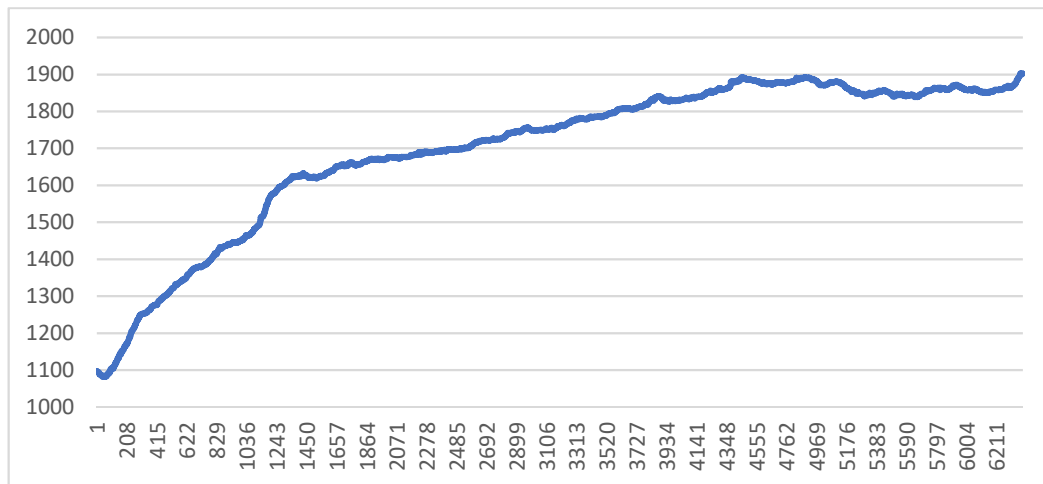
Kuva 18. Hiilidioksidimittauspisteet merkitty punaisella pisteellä ja kirjaimella



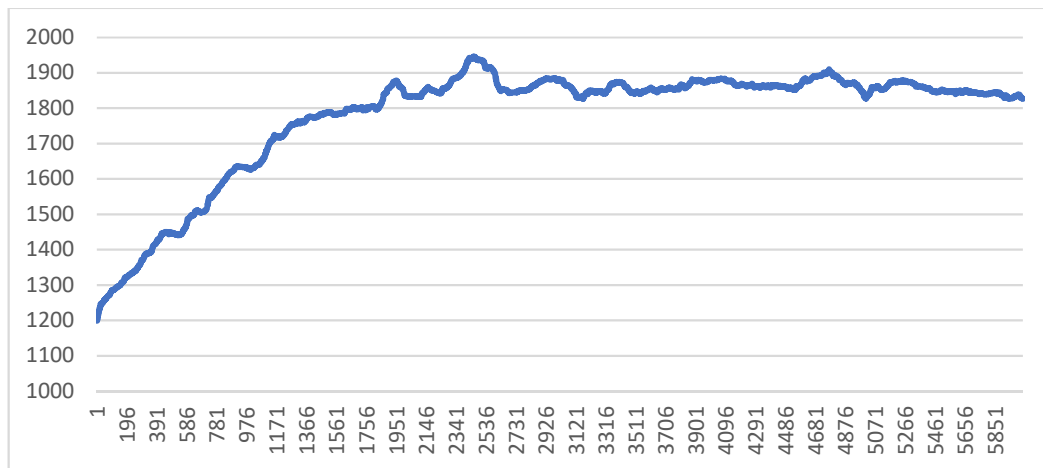
Kuva 19. Hiilidioksidimittari oven edessä

Mittari taltioi kahden sekunnin välein CO₂-pitoisuuden ppm (parts per million) yksikössä, sekä myöskin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden. Tulosten selkeyttämiseksi taulukot ovat tehty Excelillä pelkästään hiilidioksidimäärän perusteella. Mittaukset ovat tehty yhden viikonlopun aikana yhdellä mittarilla, eli niiden ajankohta ja mittauspituus vaihtelee. Liitteessä 2 on esitetty tarkemmin, kuinka hiilidioksidimittaria käytetään, sekä miten mittauks tulokset ovat taltioitu tietokoneelle.

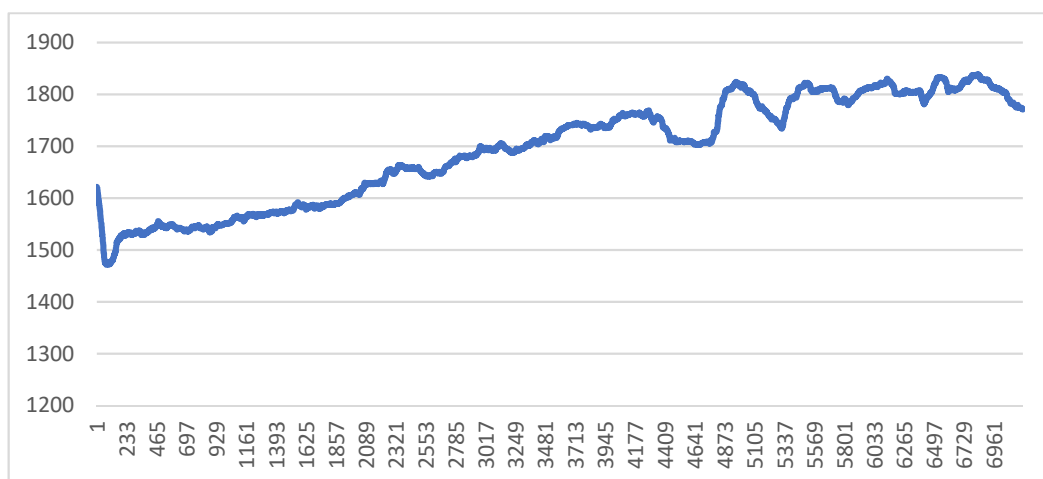
Mitatuista tuloksista katsottiin silmämääräisesti tasaantunut CO₂-pitoisuus, jota käytetään vertailuarvona Comsolista saatuihin arvoihin (taulukko 2). Matalin mitattu tasaantunut hiilidioksidipitoisuus on kaapinpuoleisessa katossa ja korkein kaapin ja sängyn välissä lattialla.



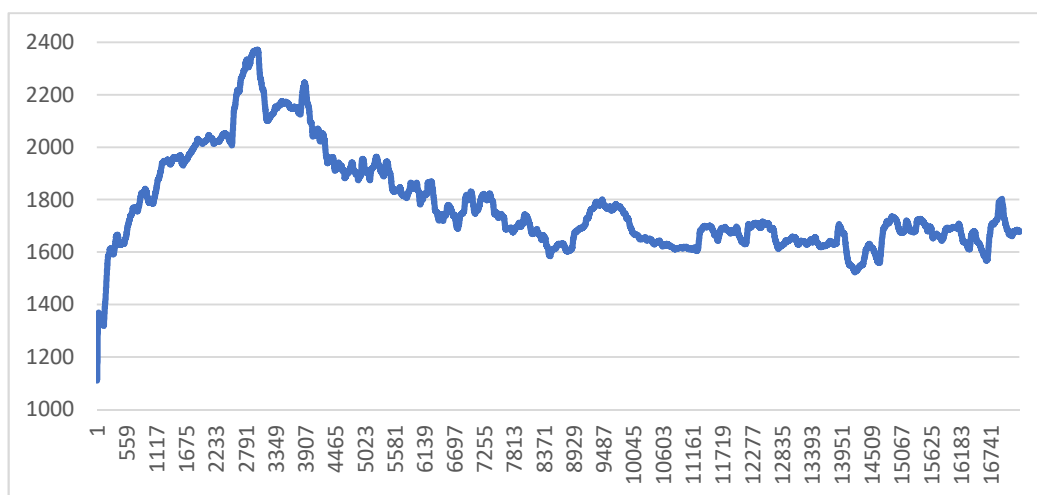
Kuvio 1. Hiilidioksidimittaus oven edessä (mittauspiste C)



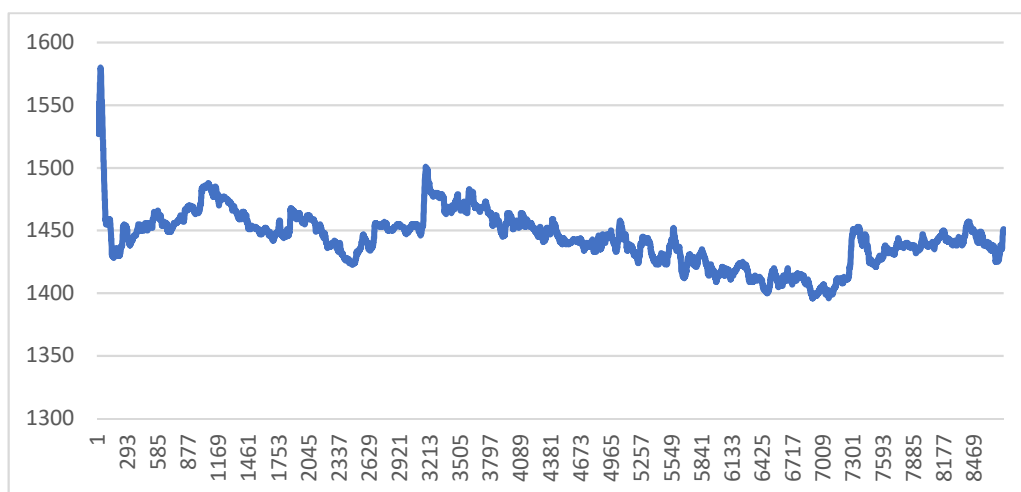
Kuvio 2. Hiilidioksidimittaus sohvalle nurkassa (mittauspiste D)



Kuvio 3. Hiilidioksidimittaus kaapin ja sängyn välissä lattialla (mittauspiste A)



Kuvio 4. Hiilidioksidimittaus katossa sängyn yläpuolella nurkassa (mittauspiste E)



Kuvio 5. Hiilidioksidimittaus kaapinpuoleinen katto (mittauspiste B)

Kuvioista 1 näemme jatkuvan hiilidioksidipitoisuuden nousun, joka tasaantuu noin 160 minuutin kohdalla arvoon 1850 ppm. Kuviossa 2 mittausarvo nousee nopeasti, ja tasaantuukin arvoon 1880 ppm jo reilun tunnin kohdalla mittauksen aloittamisesta. Kuviossa 3 näemme alussa hieman hiilidioksidipitoisuuden laskea. Tämä voi johtua siitä, että mittajaan hengityksestä johtuva hiilidioksidi on jäänyt mittaushetkellä leijumaan mittarin ympärille ja pitoisuus on hävinnyt tämän jälkeen oikeaan tilaansa. Tässä tapauksessa tasaantunut arvo voidaan katsoa alkaneen noin kahden tunnin kohdalla arvoon 1900 ppm. Kuviossa 4 nähdään raju hiilidioksidipitoisuuden nousu jopa vajaaseen 2400 ppm asti, jonka jälkeen se tasautuu 1700 ppm noin puolessa välin mittauksista. Kuviossa 5 nähdään samanlainen ilmiö, kuin kuviossa 3, mutta tasaantunut arvo voidaan katsoa alkaneen miltei heti mittauksen aloittamisesta. Tämä voi johtua siitä, että

tuloilmapäätelaitte on mittauspisteen lähellä ja voi olla, että raitista ilmaa johtuu suoraan hiilidioksidimittarille, jolloin mittaustulos tasaantuu nopeasti.

Taulukko 2. Mittauksien keskeisiä tuloksia

Mittauspiste	Kesto (min)	Minimi (ppm)	Maksimi (ppm)	Keskiarvo (ppm)	Tasaantunut arvo (silämääräisesti)
Kuvio 1 Lattialla oven edessä (piste C)	213	1082	1903	1698,5	1850
Kuvio 2 Sohvalla nurkassa (piste D)	201	1199	1946	1779,06	1880
Kuvio 3 Kaapin ja sängyn välissä (piste A)	239	1472	1839	1693,92	1900
Kuvio 4 Katossa sängyn yläpuolella (piste E)	575	1110	2372	1778,01	1700
Kuvio 5 Kaapinpuoleinen katto (piste B)	291	1396	1580	1443,62	1430

7.3 Ilmamäärämittaus

Ilmamäärämittaus suoritettiin jälkikäteen, jolloin selvisi todella korkeiksi mitattujen hiilidioksidipitoisuuksien syy. Rakentamismääräyskokoelma D2 mukaan vähimmäisilmamäärä yhden hengen makuuhuoneessa tulisi olla 6 l/s, mutta huoneesta mitattu arvo oli 2,6 l/s (kuva 21). Tämä johtui kuitenkin siitä, että ilmanvaihtokone oli syystä tai toisesta asetettu teholle 1, jolloin ilmapirrat tippuivat vajaaseen puoleen. Teholla 2 mitatut arvot olivat lähestulkoon normaalit eli noin 6 l/s.

Mittaus suoritettiin Swema 3000 -ilmamäärämittarilla, johon syötettiin venttiilin k-arvo kyseisellä säätöarvolla (kuva 21). Fläktwoods KTS- ja KSO-venttiileille

sopivalla säätöarvotyökalulla mitattuna kohteen KTS-100 venttiilin säätöarvo on 15 millimetriä, joka vastaa k-arvoltaan 3,3 (kuva 20).



Kuva 20. K-arvo-taulukko ja venttiilien rakotulkki

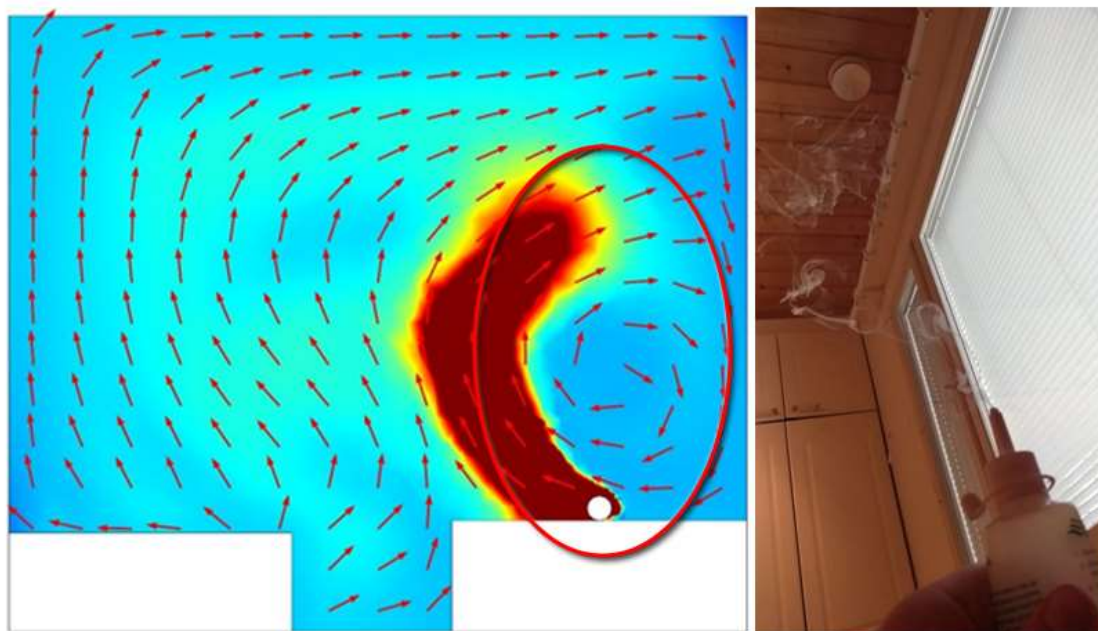


Kuva 21. Swema 3000 -mittarilla suoritettu mittaustulos

8 Tulokset ja yhteenveto

8.1 Savukoe

CFD-mallin ja savukokeiden välillä oli mittausten perusteella paljon yhtenevyyksiä. Savukokeilla voidaan todeta, että ilmavirrat seuraavat karkeasti mallin mukaisia liikkeitä. Kuvassa 5 ja tarkemmin kuvassa 22 näkyy sängyn yläpuolella tapahtuva pyörre, joka on savukokeilla varmistettu. Samoin kuvissa 15 ja 16 tapahtuvat ilman liikkeet voidaan todeta yhteneväiseksi kuvan 5 mallin kanssa. Myös kuvasta 6 katsottuna kuvan 17 savukoe vastaa suurimmilta osin mallin tuloksia.

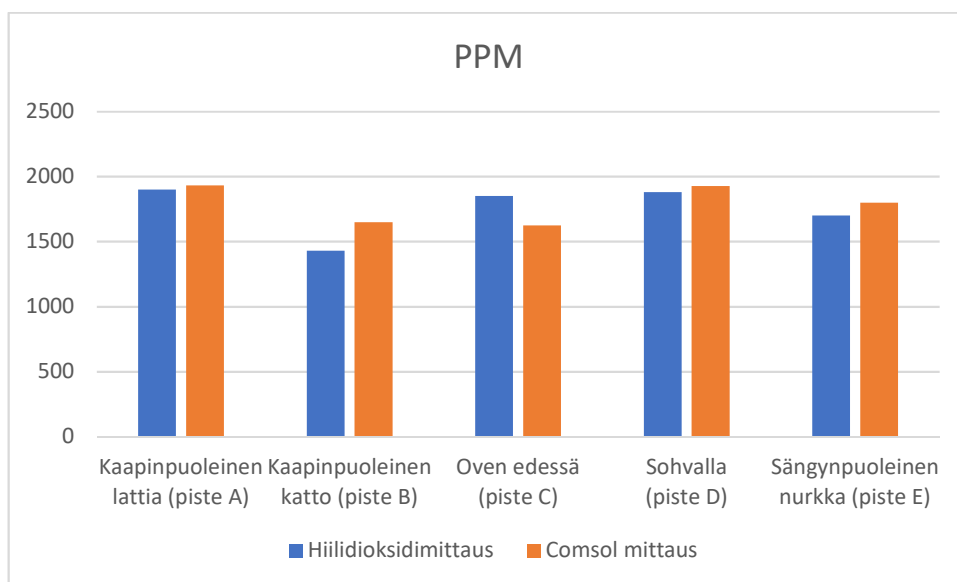


Kuva 22. Sängyn yläpuolella syntyvä pyörre

Ilmavirtojen liikkeitä voidaan mallintaa k-epsilon mallilla yllättävän tarkasti, mutta pieniä heittoja on havaittavissa. Erot voivat johtua siitä, että k-epsilon mallinnustapa on karkeahko mutta käytettyyn aikaan nähden tarkka. Eroja on voinut syntyä myös suoritetuissa savukokeissa, joissa ilman liikkeitä on voinut syntyä esimerkiksi lämpötilavaihtelujen tai hengitysilman seurauksena. Malleissa ei otettu huomioon lämmitystä, ikkunoista johtuvaa kylmää tai esimerkiksi hengitysilman tuottamaa lämpöä, joten on mahdollista, että pienet erot syntyvät näiden seurauksesta.

8.2 Hiilidioksidimittaus

Kuviossa 7 on esitetty oikean mittauksen ja Comsol-ohjelman tulokset. Näistä voidaan päätellä, että ohjelmasta saadut tulokset eivät täysin vastaa mitattuja tuloksia, mutta yhteneväisyyksiä on havaittavissa hiilidioksidipitoisuuden käyttäytymisessä. Mittauspisteissä A ”kaapinpuoleinen lattia”, D ”sohvalla” ja E ”sängynpuoleinen nurkka” mittaustulokset ovat miltei samanlaiset, mutta pisteissä B ”kaapinpuoleinen katto” ja C ”oven edessä” mittaustulokset eivät täsmää. Kyseisessä pisteissä on voinut syntyä hiilidioksidimittauksessa tai k-epsilon virtausmallissa virhe.



Kuvio 7. Hiilidioksidimittausten ja Comsol-laskennan tulosten vertailu

Mitattujen tulosten mukaan k-epsilon virtausmallilla voidaan seurata hiilidioksidin liikkeitä, mutta täysin luotettavia malleja ei opinnäytetyössä syntynyt. Hiilidioksidipitoisuuksien seuranta on kuitenkin mahdollista ja siitä saadaan hyödyllistä tietoa ilmanvaihtoa suunnitellessa, kuten kuinka hyvin hiilidioksidi poistuu huoneti-lasta ja kuinka tehokasta ilmanvaihtuvuus on.

Mittauserot oikean ja mallin välillä voivat johtua huoneessa suoritetuista hiilidioksidimittauksista, jolloin on voinut syntyä mittausvirheitä eri aikaan suoritetuista ja eri pituisista mittauksista johtuen. Tasaantuneet arvot ovat katsottu silmämääräisesti, joten muutamien kymmenien ppm-heittoja on voinut syntyä. Eroja voidaan

selittää myös sillä, että Comsol-malli ei ole täydellinen, eli mallissa voi olla laskennallisia virheitä tai malleihin on syötetty vääränlaisia arvoja ja käytetty väärä työkaluja. Comsol-malleista saadut mittaustulokset ovat muunnettu jälkikäteen laskemalla, jolloin pieniä mittauseroja voi syntyä epätarkkojen laskujen seurauksena.

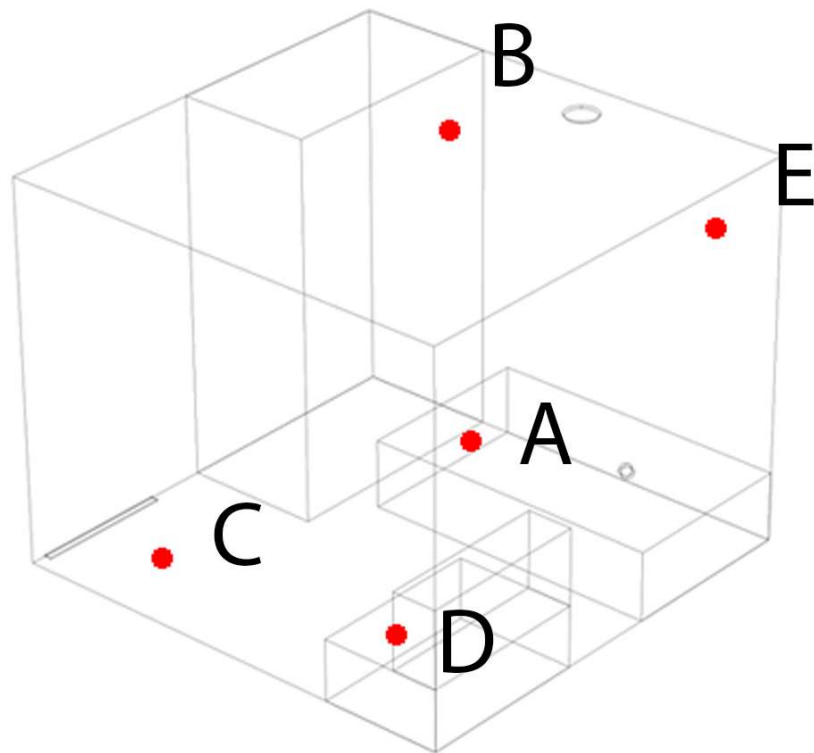
9 Päätelaitteen optimointi CFD-mallinnuksella

9.1 Sijainnit ja simulointien tulokset

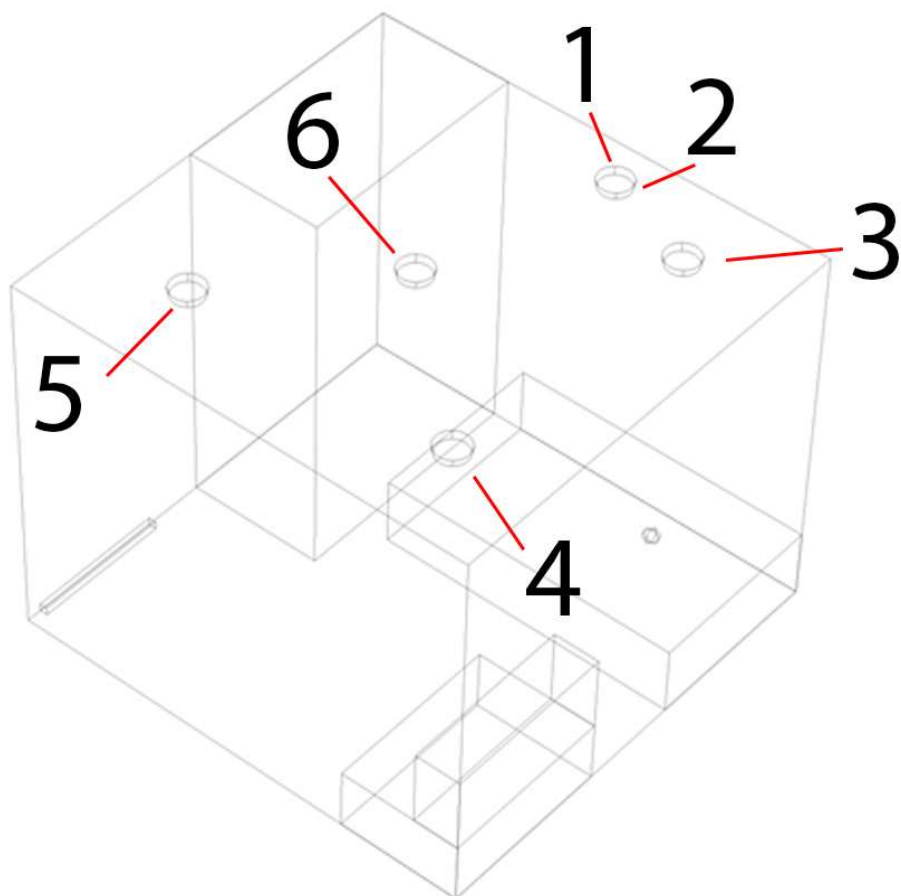
Mallin realistisuuden varmistuksen jälkeen päätelaitteen paikka optimoitiin Comsol Multiphysics –ohjelmalla siten, että käyttäjällä olisi mahdollisimman hyvä ilmanlaatu nukkuessa. Vertailu tapahtui Comsol-simuloinnin tuloksien perusteella hiilidioksidilähteen, eli ihmisen pään yläpuolelta. Päätelaitteiden mallintamiskoiksi on valittu yleisimpiä käytettyjä päätelaitteen sijainteja (kuva 24), sekä jo olemassa olevan päätelaitteen sijainti.

Verrattavia malleja on kuusi kappaletta, jotka ovat esitetty kuvassa 24. Sijainteja ovat nykyinen tilanne (sijainti 1), nykyinen tilanne suuntauslevy toiseen suuntaan (sijainti 2), päätelaite oven edessä suuntauslevy sängynpuoleiseen nurkkaan (sijainti 3), keskellä huonetta suuntauslevy sängynpuoleiseen nurkkaan (sijainti 6), sängynpuoleisessa nurkassa suuntauslevy nurkkaan (sijainti 3) ja sohvanpuoleisessa nurkassa suuntauslevy sänkyyn päin (sijainti 4). Mallinnetut tapaukset esitellään tarkemmin liitteessä 3. Jokaisessa mallissa on käytetty suuntauslevyä, jolloin tuloilmavirtaa saadaan suunnattua haluttuun suuntaan.

Hiilidioksidipitoisuuksia mitataan Comsol-ohjelmasta samoista paikoista, kuin kuvassa 23 esitetyt mittauspajat. Lisäksi ohjelmasta mitattiin päätelaitteen optimointiin eniten vaikuttava piste eli simuloidun ihmisen suun yläpuolelta. Liitteessä 3 on esitetty tarkemmin mittaustulokset Evaluation 2D-työkalulla, sekä kuvattu ilmavirtojen liikkeit.



Kuva 23. Hiilidioksidimittauspisteet



Kuva 24. Päätelaitteiden vaihtoehtoinen sijoittelu samassa kuvassa

Taulukko 3. Comsol-ohjelman laskentatulokset

	Kaapin- puolei- nen lattia (piste A)	Kaapin- puolei- nen katto (piste B)	Oven edessä (piste C)	Sohvalla (piste D)	Sängyn- puolei- nen nurkka (piste E)	Pään yläpuo- lella
Comsol oikea tilanne (sijainti 1)	1931	1649	1625	1928	1799	1741
Suuntauslevy toiseen suun- taan (sijainti 2)	2102	2100	1732	1636	3377	2956
Sängynpuolei- sessa nurkassa (sijainti 3)	919	1114	1585	1150	1153	1163
Sohvanpuolei- sessa nurkassa (sijainti 4)	1553	1595	1594	1990	1645	1621
Oven edessä (sijainti 5)	1301	1405	1682	1277	1434	1427
Keskellä (sijainti 6)	1592	1760	1849	2763	1756	1738

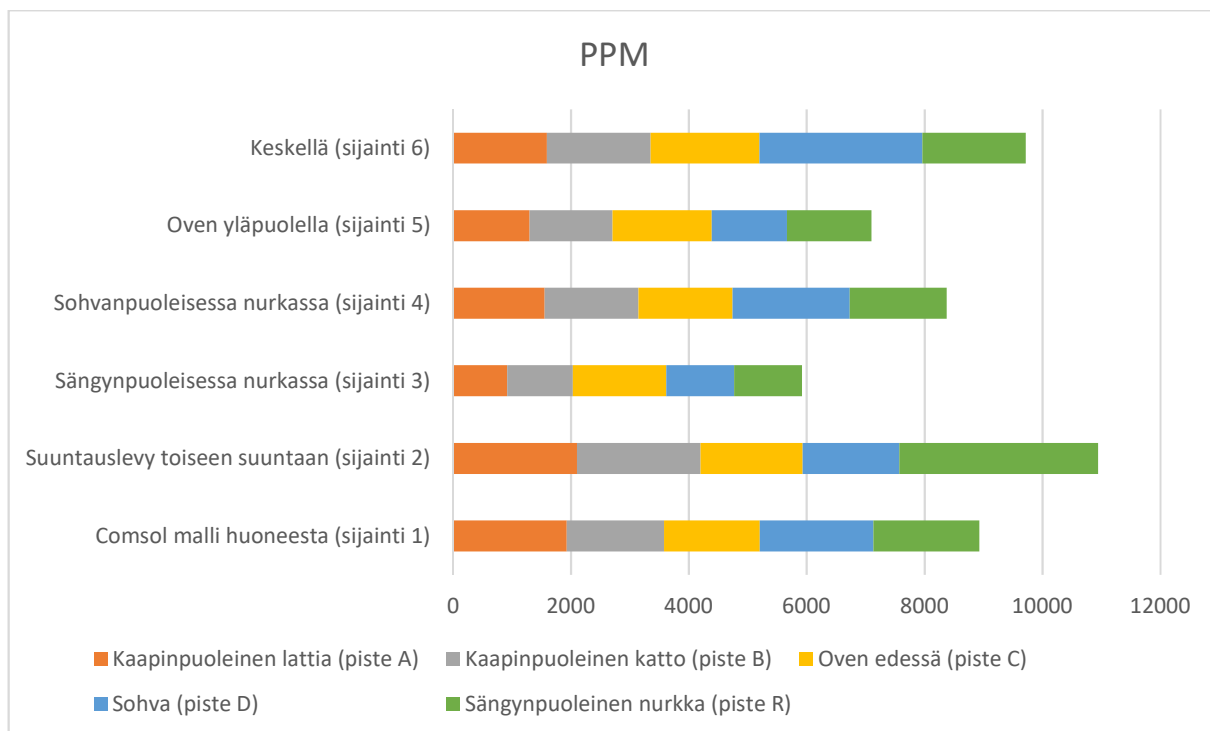
9.2 Optimoinnin tulokset ja analyysi

Taulukon 3 mittaustulosten mukaan nykyinen tilanne on hiilidioksidipitoisuudet yhteenlaskettuna keskiarvoa huonompi sijoituspaikka päätelaitteelle. Kuviosta 8 katsottuna parempia päätelaitteen sijoituspaikkoja hiilidioksidipitoisuuksien mukaan olisi sohvanpuoleisessa nurkassa (sijainti 4) ja oven edessä (sijainti 5). Vähiten hiilidioksidia huoneilmassa yhteensä on silloin, kun päätelaite on sijoitettu söngynpuoleiseen nurkkaan (sijainti 3).

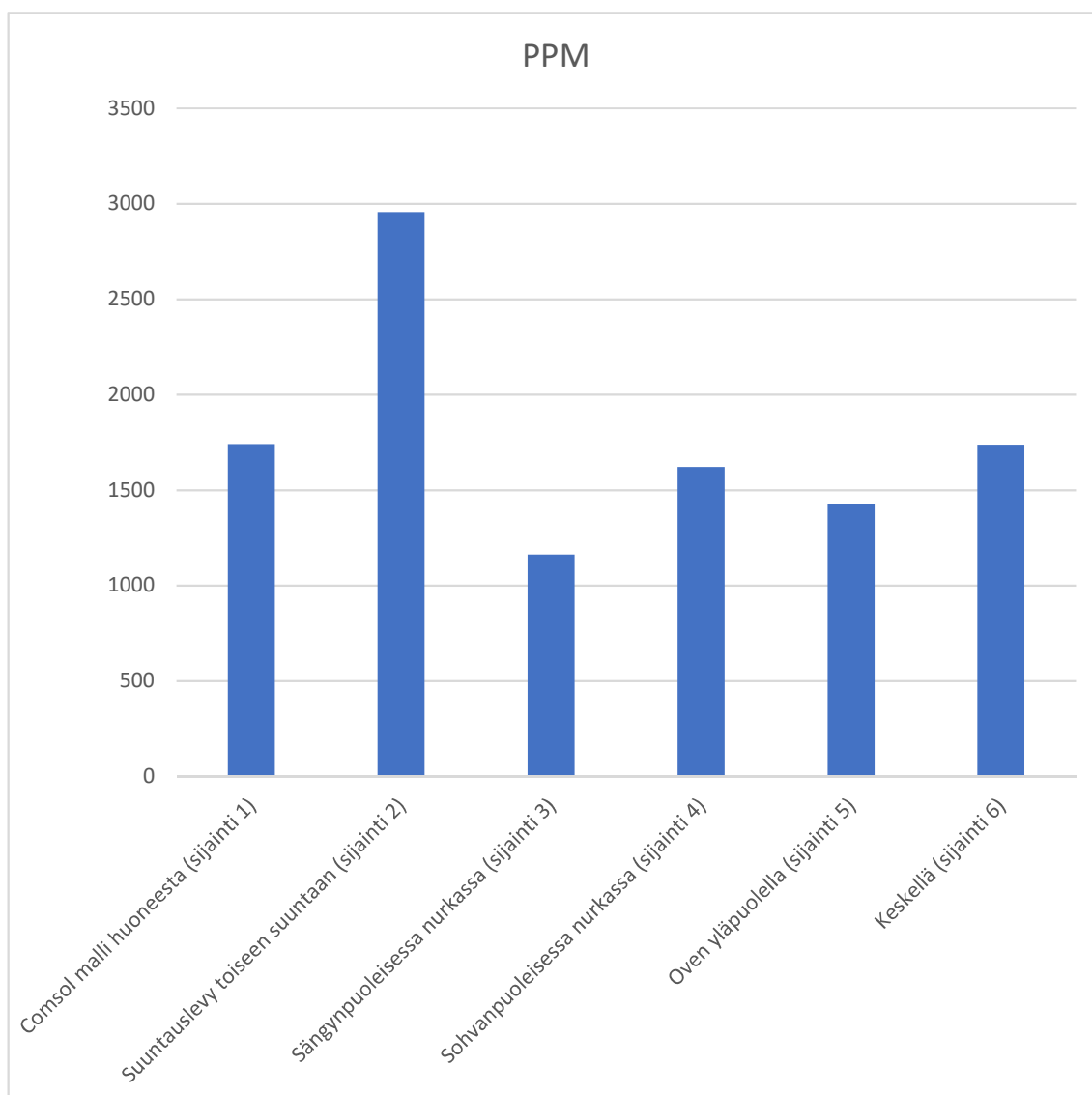
Käyttäjälle eli tässä tapauksessa nukkujalle tärkein mittaustulos on kuitenkin pään yläpuolelta mitattu hiilidioksidipitoisuus, jotta hengitysilma olisi mahdollisimman puhdasta. Kuvion 9 mukaan oikean tilanteen malli (sijainti 1) on toiseksi huonoin ja näistä tuloksista paras sijoituspaikka päätelaitteelle on söngynpuoleisessa nurkassa (sijainti 3). Matalat hiilidioksidiarvo selittyvät sillä, että päätelaite on sijoitettu niin lähelle nurkkaa ja sen ilmavirta on suunnattu päinvastaiseen nurkkaan ovesta, on tuloilman helppo syrjäyttää vanha likainen ilma raikkaalla ilmalla,

jolloin epäpuhtaudet siirtyvät nopeasti kohti ovirakoa. Sama ilmiö voidaan todeta, mutta hieman heikommin toimivaksi silloin kun päätelaite on sijoitettu esimerkiksi oven yläpuolelle tai sohvanpuoleiseen nurkkaan.

Huonoin mitattu tulos on silloin, jos suuntauslevy on suunnattu mallin huoneessa päinvastaiseen suuntaan. Tämä selittyy osittain sillä, että päätelaitteen alapuolelle ei tule yhtään uutta raitista ilmaa, vaan se kiertää toiselle puolen makuuhuonetta, jonka jälkeen se päättyy oviraosta ulos. Osa ilmavirrasta jää pyörimään huonetilaan, muttei huuhtelee sängyn lähistöltä hengitysilmaa juuri ollenkaan (liite 3).



Kuvio 8. Hiilidioksidipitoisuudet yhteenlaskettuna

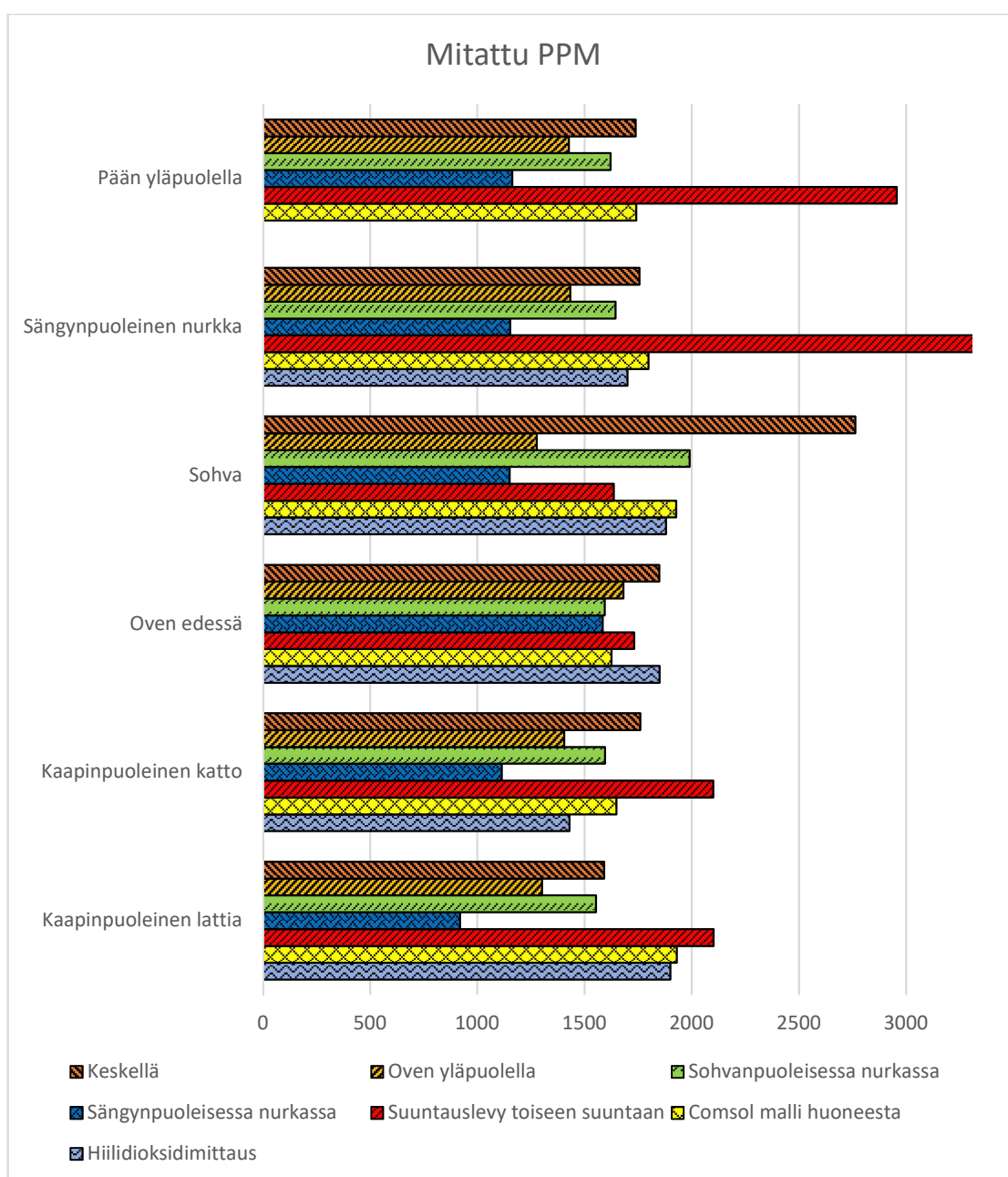


Kuvio 9. Hiilidioksidipitoisuus Consol-ohjelmasta hiilidioksidilähteen yläpuolelta

Kuvion 10, kuvion 8 ja taulukon 3 perusteella päätelaitteen sijoituksella on merkitystä silloin, jos pyritään minimoimaan hiilidioksidipitoisuus huoneessa tai jos halutaan minimoida tietyn alueen pitoisuuksia. Varsinkin mittauksista "suuntauslevy toiseen suuntaan" (sijainti 2) ja esimerkiksi "keskellä" (sijainti 6) voidaan päätellä, että hiilidioksidi jää huoneilmaan "leijumaan" eri kohtiin päätelaitteen sijoituksesta ja suuntauksesta riippuen. Huonosti sijoitetun päätelaitteen takia voi ilmanvaihto toimia erittäin huonosti ja pahimmassa tapauksessa hiilidioksidipiikki voi muodostua kriittisiin oleskelupaikkoihin.

Taulukosta 3 ja kuviosta 10 voidaan todeta myös, että makuuhuoneen ilmanvaihduvuutta voidaan muokata siten, ettei hiilidioksidi jäisi huonetilaan, vaan sen pitoisuus pyrittäisiin optimoimaan mahdollisimman matalaksi. Päätelaitteen sijainti

voidaan optimoida loppukäyttäjälle huoneen käyttötarkoituksen mukaan. Ilmanvaihtoa voidaan myös tehostaa samalta päätelaitteen sijainnilta pelkästään suuntauslevyn suuntaa muuttamalla. Mittaustulosten perusteella paras ilmanvaihtuvuus saadaan siten, että ilmavirta suunnataan sinne nurkkaan tai seinään, joka on huoneen ovea vastapäätä. Tällöin ilmavirta suuntautuu katon kautta seinään, josta se tippuu alas lattian tasoon ja sitä kautta loppujen lopuksi oviraosta ulos. Päätelaitteen sijainnilla on kuitenkin suuri merkitys siinä, kuinka hyvin ilma saadaan vaihdettua koko huoneen alalta ja kuinka tehokkaasti niin, ettei likainen ilma jää huonetilaan pyörimään.



Kuvio 10. Kuuden mallinnetun tapauksen sekä hiilidioksidimittausten tulokset

Päätelaitteiden lopullisen sijoituspaikan päättää Ivi-suunnittelija, jonka täytyy ottaa huomioon myös muita merkittäviä sijoituspaikkaan vaikuttavia tekijöitä. Rakennuksen rakenteet, suunnittelu ratkaisun hinta, ääniongelmia ja esimerkiksi mahdollinen vedontunne ratkaisee sen, kuinka päätelaite voidaan sijoittaa. Hiilidioksidimittausten perusteella paras sijoituspaikka päätelaitteelle olisi ovea vastapäätä oleva nurkka ja suuntauslevy suunnattuna nurkkaan päin. Tässä tapauksessa kyseisen sijoituspaikan vaarana on, että nukkujalle tulisi helposti vedontunnetta ja tällöin se olisi loppukäyttäjälle epämieluisin vaihtoehto. Päätelaitteesta voi myös väärinsijoitettuna ja väärin mitoitetuna pitää kovaa meteliä, joka suoraan pään yläpuolella häiritsee mahdollista nukkujaa.

Hiilidioksidipitoisuudet muuttuisivat radikaalisti, jos uudet mittaukset suoritettaisiin Rakennusmääräyskokoelma D2 -mukaisilla vähimmäisilmamäärillä. Tästä johtuen voi olla, ettei päätelaitteen sijainnilla ole hiilidioksidipitoisuuksiin merkittävää vaikutusta, mutta varsinkin vedontunteeseen ja ilmanvaihdon tehokkuuteen päätelaitteiden sijaintia voidaan optimoida. Tarvittavan ilmanvaihdon määrä voidaan laskea keskimääräisesti myös kaavasta 1 [23].

$$C_{olesk} = C_{tausta} + \left(\frac{G_{Co}}{q_{tulo}} \right) \quad (1)$$

missä

C_{olesk} = hiilidioksidipitoisuus huoneilmassa, ppm

C_{tausta} = hiilidioksidipitoisuus ilmakehässä, ppm

G_{Co2} = CO₂ tuotto MET kerrannaisen mukaan, cm³/h

q_{tulo} = tuloilman määrä, m³/s

Nukkuessa ihmisen metabolinen ekvivalentti (MET) on 0,8, joka vastaa hiilidioksidintuotoltaan 12,4 dm³/h, eli noin 2 dl/min [9]. Tällöin kaavasta 1 laskettuna 2,6 l/s tuloilmavirralla hiilidioksidipitoisuudeksi saadaan 1746,15 ppm, joka vastaa

hyvin huoneesta mitattuja hiilidioksidipitoisuuksia. Asumisterveysasetuksen mukaiset toimenpiderajat ovat ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden lisäksi 1150 ppm, jolloin mallinnetussa tapauksessa rajana on 1550 ppm [10]. Tähän lukemaan päästäisiin kaavalla 1 laskettuna jos tuloilmanmäärä olisi 3,04 l/s. Uudisrakennuksissa vaadittu maksimi hiilidioksidipitoisuusraja on 800 ppm ulkoliman hiilidioksidipitoisuuden lisäksi, jolloin kaavalla 1 laskettuna tuloilmaa pitää tulla vähintään 4,37 l/s [10]. Määräykset kuitenkin velvoittavat tuloilmamääräksi vähintään 6 l/s/hlö, jolloin hiilidioksidipitoisuus mallinnettavassa kohteessa tippuisi 983 ppm:iin.

10 Pohdinta

Tämän opinnäytetyön mallit ovat savukokeiden valossa ilmavirtojen puolesta luotettavia, mutta hiilidioksidimittausten ja mallista mitattujen arvojen perusteella ei voida luottaa täysin mallien antamiin tuloksiin. Merkittäviä yhteneväisyyksiä kuitenkin on havaittavissa, joten on mahdollista, että päätelaitteiden sijaintia voidaan optimoida CFD-mallinnuksella.

Yhdellä mittarilla suoritettut mittaukset jättävät arvailujen varaa, joten mallin realistisuuden varmistamiseen tarvittaisiin uusia hiilidioksidimittauksia useammalla mittarilla, jotta voidaan tieteellisesti todistaa mallin paikkansapitävyys. Jos uusilla mittauksilla suoritettut mallit ovat yhteneväisiä mittaustuloksiin, voitaisiin päätelaitteen sijainti optimoida tarkemmin ja luotettavammin. Jo näillä parannuksilla voitaisiin saada paljon tarkempia tuloksia, ja makuuhuoneiden ilmanlaatua ja asuismukavuutta parannettua.

Makuuhuoneen ilmavirtoja voidaan mallintaa yksinkertaisellakin mallilla yllättävän tarkasti, ja se on suhteellisen nopeaa sen jälkeen, kun on oppinut käyttämään tarvittavia ohjelmia tai työkaluja. Ilmavirtamalleista voidaan tulkita esimerkiksi mahdollisia vedontunteen aiheuttavia paikkoja ja näin ollen välttää suunnittelemasta niitä kriittisiin paikkoihin. Tietokonemallinnettavat tilanteet vaativat sen, että niiden luoja osaa ottaa huomioon kaikki huoneessa vallitsevat muuttujat,

muutoin ne eivät ikinä täysin vastaa oikeaa tilannetta. Ilmavirtojen liikkeet ovat hyvin alttiita huoneessa vallitseville muuttujille, kuten esimerkiksi lämpötilanvaihteluille tai ihmisen aiheuttamille ilmavirroille. Mahdollisista epävarmoista malleista kuitenkin saadaan tietyn tilanteen mukaan laskettuja keskiarvoja, joiden perusteella voidaan analysoida, kuinka hyvin ilmanvaihto toimii mallinnetussa tilanteessa.

Tutkimustulosten mukaan jo päätelaitteen suuntauksella tai pienelläkin ilmamäärän lisäyksellä on merkittävä vaikutus huoneilmanlaatuun, tämä kannattaa ottaa huomioon varsinkin saneerauskohteissa, joissa päätelaitteen sijaintia on vaikea tai jopa mahdotonta muuttaa. Uudiskohteissa mallinnuksen avulla voidaan ilmanvaihdon tehokkuutta suunnitella taloudellisemmaksi, mutta nykyisten määräysten ja vallitsevien rakennustapojen puitteissa merkittävää huoneilman laatua parantavaa vaikutusta CFD-mallinnuksella ei välttämättä saada. Mallinnuksesta voi kuitenkin olla hyötyä vaikeissa tai epäselvissä kohteissa, jossa ilmanvaihtoratkaisujen eri variaatioiden kokeilu on hankalaa tai hyvin kallista.

Jatkokehitysmahdollisuutena voisi olla huoneen mallin tarkentaminen siten, että tarkemman 3D-mallin suunnittelu tehtäisiin Autocad-ohjelmistolla, joka sitten tuotaisiin Comsol Multiphysics -ohjelmaan import-toiminnolla. Tämän lisäksi päätelaitteen tarkempi mallintaminen ja laskentaverkon tiheyden muuttaminen tarkemmaksi voisi tuoda parempia tuloksia. Näiden muutosten tekeminen kuitenkin vaikeuttaa laskentatapauksen ratkaisemista, koska laskentaverkon tarkkuutta joudutaan tihentämään. Tästä johtuen yhden mallin laskemiseen voi kulua useita tunteja, ellei päiviä, vaikka mallinnusta suorittava tietokone olisi kuinka tehokas. Laskentaverkon hankaloituessa ohjelman on myös hankalampi löytää oikeaa ratkaisua, mutta viskositeetti ramping toiminnolla ja erilaisella virtausmallinnuksella se voisi olla mahdollista.

Lisäksi mallin realistisuuden toteamiseen tulisi suorittaa lisää mittauksia ja laajempia käytännön tutkimuksia muissakin valmiissa kohteissa. Suuremmilla ilmamäärillä tai useammalla hiilidioksidin lähteellä voitaisiin saada mielenkiintoista tutkimustietoa, jota olisi mahdollista hyödyntää tulevaisuudessa ilmanvaihtojen parantamisessa. CFD-mallia voisi myös verrata toisen ohjelman suorittamaan

samanlaiseen malliin. Malleissa voisi ottaa huomioon myös lämpötilavaihtelut, joita ei tässä opinnäytetyön malleissa huomioitu.

Opinnäytetyössä syntynyttä mallia ja siitä saatujen tulosten perusteella voidaan sitä hyödyntää päätelaitteen sijoittelussa tai vaikka sen muotoilussa. Tämä kuitenkin edellyttää sitä, että mallinnettavan kohteen lähtötiedot ovat tarkkaan tiedossa ja lopullinen huoneen käyttökohde on sama, kuin suunnitteluhetkellä.

Ilmanvaihdon merkitys omakotitalon asujien hyvinvointiin on helppo aliarvioida. Ilmanvaihtokoneen sammuttamiseen tai vajaakäytön voidaan ajatella tuovan säästöjä, mutta kuluttajat eivät kuitenkaan ota huomioon sitä, että ilmanvaihtokoneella on tehtävänä poistaa suunnitellusti ja sopivalla tehokkuudella kosteutta tai muita huoneilman laatua heikentäviä tekijöitä, sekä tuoda puhdasta ilmaa hengitettäväksi. Jos ilmanvaihtokoneen käyntinopeutta pienentää tai sen sulkee kokonaan ei ilma pääse vaihtumaan ja epäpuhtaudet jäävät sisäilmaan, jolloin se voi jopa vaikuttaa merkittävästi asukkaan elinoloihin.

Korkea hiilidioksidipitoisuus huoneilmassa johtuu yleensä puutteellisesta ilmanvaihdosta kuormitukseen nähden. Tarpeeksi korkea pitoisuus voi aiheuttaa jopa päänsärkyä, keskittymisvaikeuksia, väsyneisyyttä tai pahoinvointia. Ilmanvaihdolla voidaan siis tehostaa esimerkiksi tuottavuutta työpaikoilla tai oppimiskykyä kouluissa. Ilmanvaihdon merkitys kosteissa tiloissa on myös merkittävä, koska kosteus on saatava haihdutettua mahdollisimman tehokkaasti, jotta se ei jäisi rakenteisiin. Jos ilmanvaihtokone ei vaihda tarpeeksi ilmaa esimerkiksi pesuhuoneista, on todella suuri riski, että kosteuden takia rakenteet alkavat lahota ja homehtua. Tällöin olematon säästö sähkönkulutuksessa tuo ajan saatossa suuria sisäilmaongelmia tai jopa vaurioittaa rakennuksen rakenteita siten, että se täytyy purkaa kokonaan.

Lähteet

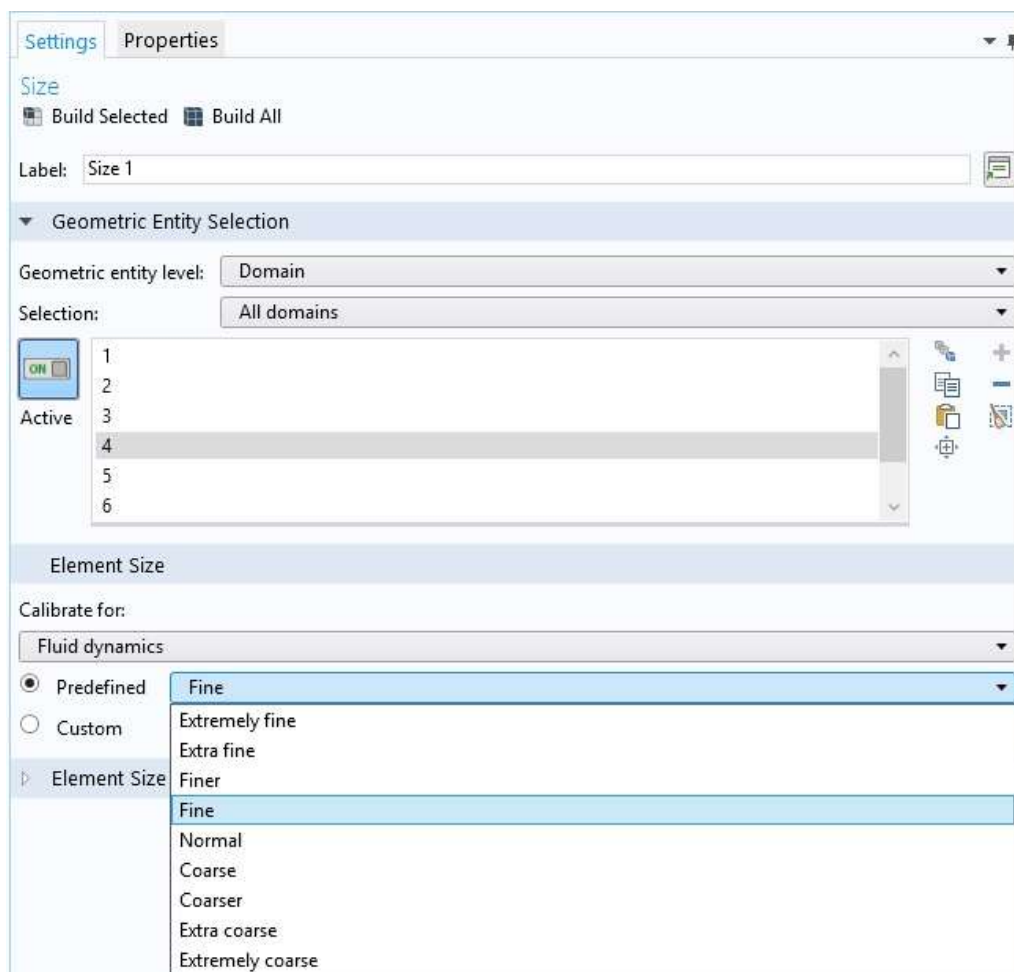
1. Simscale.com. What is CFD. [Päivitetty 22.12.2017] [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: <https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/cfd/whatis CFD.html>
2. Simscale.com, What are the Navier-Stokes Equations?. [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: <https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/numerics/what-are-the-navier-stokes-equations.html>
3. Laine, S. Katsaus virtauslaskennan kehitykseen. 2013 [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: https://www.lut.fi/c/document_library/get_file?groupId=10633&uuid=1318142a-e8b8-4b65-9dfa-f4351ccc5be9
4. CFD-online. Historical perspective. [8.2.2013] [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: https://www.cfd-online.com/Wiki/Historical_perspective
5. Wendt, J. 1992. Computational Fluid Dynamics. New York: Springer-Verlag Heidelberg
6. Tiedebasaari.com. ilmakehän hiilidioksidipitoisuus. [22.4.2017] [Viitattu 24.2.2018] Saatavissa: <https://tiedebasaari.com/tag/ilmakehan-hiilidioksidipitoisuus/>.
7. Pietiko.fi. hiilidioksidipitoisuus sisäilman laadun mittarina. [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: <http://www.pietiko.fi/mittaustietoa/hiilidioksidipitoisuus-sisailman-laadun-mitta>
8. Kysy.fi. Paljonko maapallon kaikki ihmiset tuottavat co2: hengityksellään. [Julkaistu 6.2.2008] [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: <http://www.kysy.fi/kysymys/paljonko-maapallon-kaikki-ihmiset-tuottavat-co2ta-hengityksellaan>
9. Terveyskirjasto, MET – energiankulutuksen ja fyysisen aktiivisuuden mittari [Julkaistu 2.12.2015] [Viitattu 22.2.2018] Saatavissa: https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk01039
10. Asumisterveysasetus. Julkaistu 23.4.2015
11. Suomen säädöskokoelma. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta [Julkaistu 10.9.2017] [Viitattu 22.2.2018] Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7BAAD7DB92-F571-4766-A3F1-BFF63383191B%7D/133875>
12. Rakennustieto.fi. Sisäilmaluokitusta uudistettiin. [Julkaistu 8.12.2015] [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK020303.pdf>
13. Rakennustieto.fi Sisäilmaluokitus 2017 luonnos. [Julkaistu 31.5.2017] [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/5fl-PeDhrH/MrJiFu6nl/si2017-luonnos_300517_lausunnonle.pdf
14. Comsol. Release-history. [Päivitetty 14.12.2017] [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: <https://www.comsol.com/release-history>
15. Process flow Solution Ltd Oy. CFD-virtauslaskenta. [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: <http://www.processflow.fi/virtauslaskenta/>
16. Comsol multiphysics. Simulate fluid flow applications with the cfd module. [Päivitetty 16.5.2014] [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: <https://www.comsol.com/cfd-module>
17. Suomen säädöskokoelma. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta [Julkaistu 10.9.2017] [Viitattu 22.2.2018] Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7BAAD7DB92-F571-4766-A3F1-BFF63383191B%7D/133875>

18. Talotekniikkainfo.fi Ilmanvaihdon mitoituksen perusteet [Julkaistu 30.11.2017] [Viitattu 22.2.2018] Saatavilla: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B59DC42F9-7C8A-4CBE-817E-1E2DBB67E02E%7D/133706>
19. D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 2012. 30.3.2011 [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: www.finlex.fi/data/normit/37187-D2-2012_Suomi.pdf
20. Comsol. Blogs, which turbulence model should choose. [Julkaistu 6.7.2017] [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>
21. Marra, V. The Basics of CFD Simulation with COMSOL in 18 Minutes. Webinar. 23.1.2018. Kuva: Comsol webinaari
22. Trotec. Lataukset. Käyttöohje CO2 ilmanlaadun tiedonkeruulaite BZ30, s. 167. [Päivitetty 16.1.2017] [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: <https://fi.trotec.com/fileadmin/downloads/Messgeraete/klima/BZ30/TRT-BA-BZ30-HS-008-INT.pdf>
23. Tilan ulkoilmavirran mitoitus hiilidioksidikuormituksen perusteella. Kimmo Liljeström, Optiplan. 2017. [Julkaistu 31.10.2017] [Viitattu 24.2.2018] Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7BDB0C587C-E567-446B-8997-418132D6B220%7D/133744>

Mallin luominen Comsol Multiphysics -ohjelmistolla

Uusi malli luodaan käyttämällä "Model Wizard" työkalua aloitusnäytössä. Koska malli tulee olemaan kolmiulotteinen, valitaan "Space Dimension" valikosta 3D ja tämän jälkeen valitaan mallille sopivat fysiikat. Työssä käytettiin kahta erilaista fysiikkaa, jotka olivat "Transport of Diluted Species (tds)" ja "Laminar Flow (spf)". Laskentamenetelmäksi valittiin "Stationary", joka pyrkii laskemaan mallin ilmavirrat siten, että ne ovat vakaita.

Geometry-työkalulla luodaan malliin vaadittavat huonekalut ja muut välttämättömät objektit. Materials-välilehdeltä määritellään kaikille objekteille, että mitä materiaalia ne ovat. Tämän jälkeen Mesh-työkalulla luodaan laskentaverkko ja määritellään sen tiheys. Vaihtoehtoina on yhdeksän tiheyttä, sekä neljä erilaista kalibrointiasetusta (kuva 2). Työssä on käytetty "fine" verkkoa, sekä kalibrointiasetuksena "Fluid Dynamics" vaihtoehtoa.



Kuva 2. Mesh-työkalun asetukset

Tämän jälkeen määritellään ilmavirtojen, sekä hiilidioksidilähteen asetukset. Laminar flow valikon asetuksista valitaan "Turbulence model type – RANS", ja "Turbulence model – k-ε".

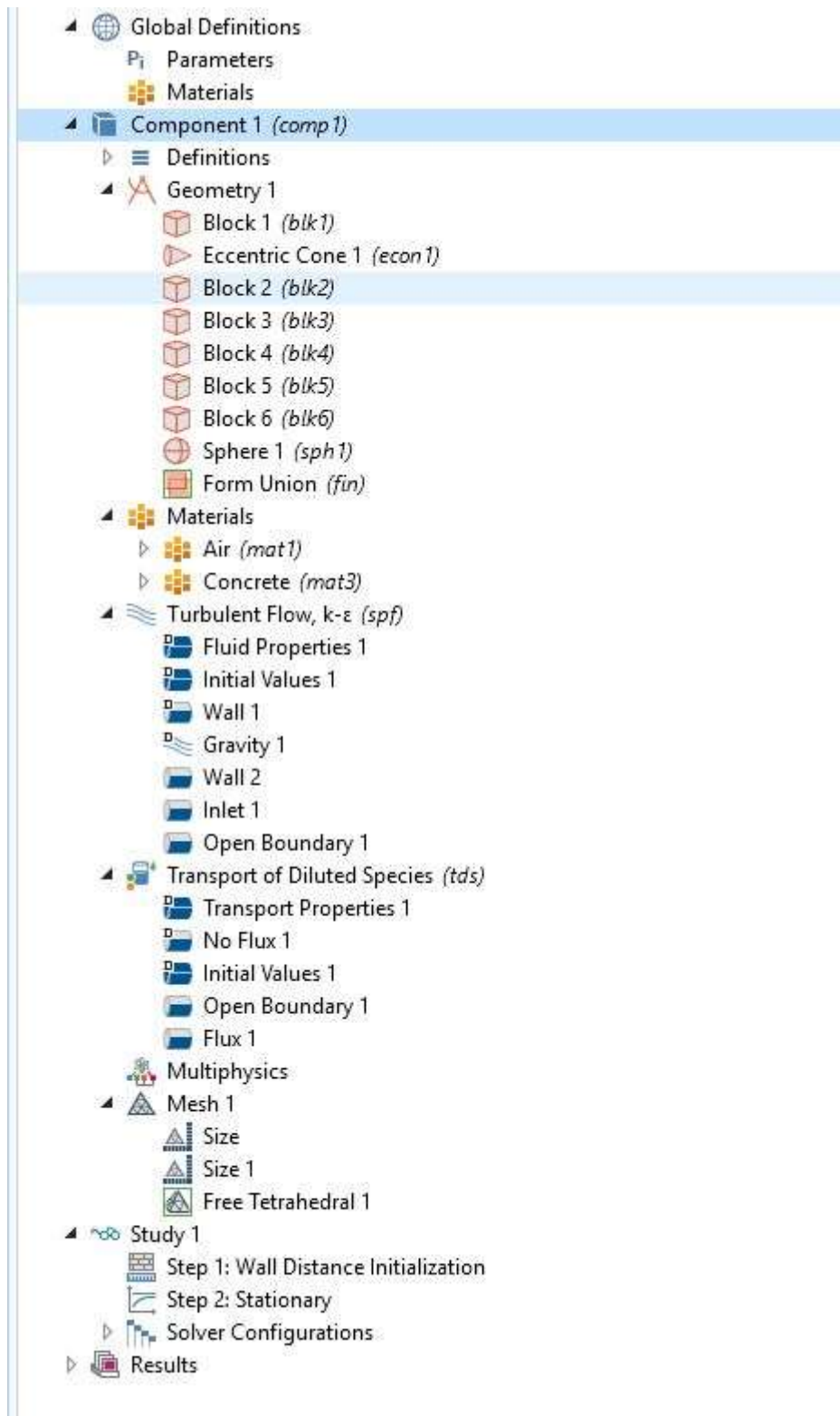
Turbulent flow ja Transport of diluted species asetusvalikkoihin lisätään "Inlet" ja "Open Boundary". Näiden "Boundary Selection" valikosta valitaan luoduista objekteista tuloilman tulolähde, hiilidioksidin tulonlähde sekä molempien poistumistie. Päätelaitteen tuloilmamäärä määritellään inlet-valikosta massavirta tyyppiseksi ja ilmamäärämittausten mukaisesti mitatulle arvolle, joka on 2,6 l/s. Tämä muutetaan m³/s muotoon ja kerrotaan ilman tiheydellä 1,2 kg/m³, jolloin tulokseksi saadaan 0,00312 kg/s.

Transport of diluted species alavalikkoon "Initial Values" kohtaan määritellään mallissa ilmatila, johon hiilidioksidilähteestä tuleva hiilidioksidi sekoittuu. Tähän on laitettava maapallon ilmakehän hiilidioksidipitoisuus, joka on noin 400ppm. Tämä täytyy muuttaa mol/m³ muotoon, eli tämä saadaan laskemalla, kuinka paljon hiilidioksidia on kuutiossa mooleina.

Ideaalikaasu ainemäärä normaalipaineessa ja lämpötilassa on 22,41 litraa eli 1 mol = 22,41. Kuutiossa ilmaa on siis $1000/22,41 = 44,6229 \text{ mol/m}^3$. Ilmakehän normaali hiilidioksidipitoisuus on noin 400ppm (parts per million) eli kuutiossa on hiilidioksidia $(400/1000000) * 44,6229 \text{ mol/m}^3 = 0,017849$. "Initial Values" kohtaan täytyy laittaa 0,017849 mol/m³. Hiilidioksidilähteen pinnalle on asetettava arvo mol/(m²*s) saadaan laskemalla pallon pinta-ala hiilidioksidia tuottavilta alueilta eli 0,015708 m². Ihminen tuottaa noin 2 dl hiilidioksidia minuutissa eli 0,0033 l/s. 1 mol ideaalikaasua = 22,41 l, jolloin 1 litra = 0,044623 mol. $0,0033 \text{ l/s} * 0,044623 \text{ mol} = 0,000147 \text{ mol/s}$. Pallon pinnalta on lähdettävä siis $0,000147 \text{ mol/s} / 0,015708 \text{ m}^2 = 0,009358 \text{ mol/(m}^2\text{*s)}$

Virtauslaskennan helpottamiseksi "Parameters" välilehdelle asetetaan muuttujaksi "Viscosity ramping", jonka avulla ilman viskositeettiä pienennetään asteittain [8]. Tämän muuttujan ansiosta simulointiajat tippuvat huomattavasti ja ohjelma

löytää ratkaisun helpommin. Tästäkin huolimatta mallinnus ajat ovat olleet tätä työtä tehdessä 15min-4,5h.

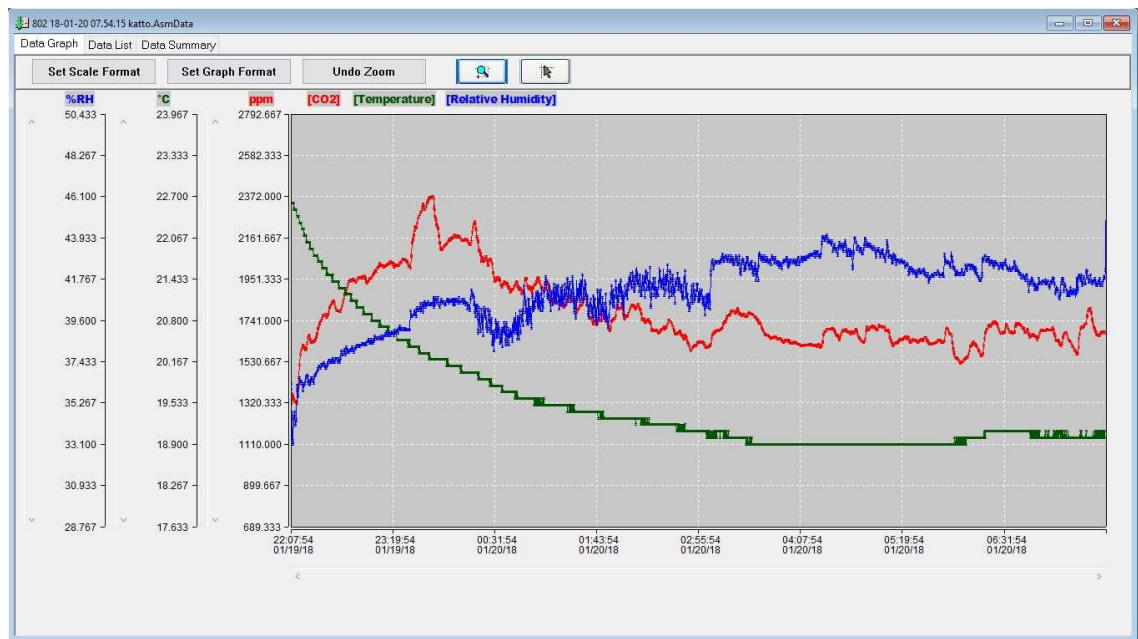


Kuva 1. Model Builder valikko kaikkien asetusten asettamisen jälkeen

Hiilidioksidimittarin käyttö ja tulosten taltiointi

Hiilidioksidimittarina työssä käytettävä Trotec BZ30-tiedonkeruulaite mittaa ilman CO₂-pitoisuutta ppm yksikössä, sekä lämpötilaa Celsius- tai Fahrenheit-asteikolla ja suhteellista ilmankosteutta prosentteina. Laitteen tuotesivuilta on ladattavissa tuotteelle ajurit, sekä tarvittavat ohjelmistot mittaustulosten taltiointiin.

Jokaisen mittauskerran jälkeen laite on kytkettävä tietokoneeseen, jossa on ”BZ30 Multiple Datalogger”- ohjelmisto, ja nollattava lähtötiedot joita ovat esimerkiksi päivämäärä ja näytteenottotiheys, sekä hälytys raja-arvot. Laitteen ohjelmitoasetuksista voidaan myös määritellä milloin laite aloittaa mittauksen tai se voidaan asettaa manuaali asentoon, jolloin käyttäjä itse käynnistää mittauksen suoraan laitteesta. Mittaustulokset voidaan tallentaa joko Excel tiedostoon tai ohjelmiston omaan projektitiedostoon (kuva 1).

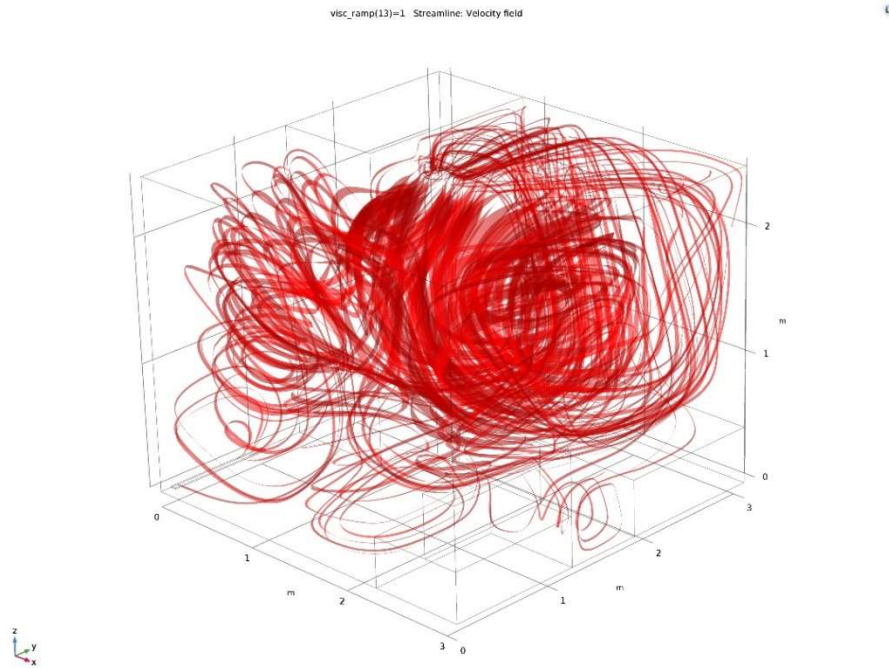


Kuva1. Mittaustulos katosta sängyn yläpuolelta

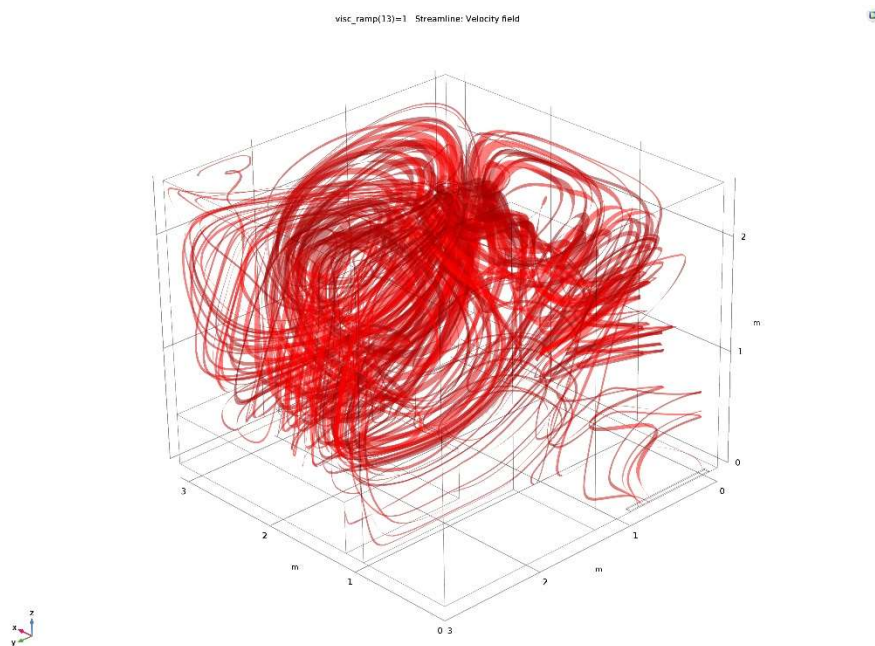
Simulointi tulokset päätelaitteiden optimoinnista

Leikkauskuvissa esitetään taustalla muuttuja c (concentration (mol/m^3)) / $44,6 \text{ mol} \cdot 1000000$ jolloin tulos saadaan suoraan ppm mittayksikköön. Taustojen värit kuvaavat pitoisuuksia sinisestä punaiseen väliltä 750-2500 ppm ja nuolilla normalisoitu Velocity field eli ilman liikkumissuunta voimakkuudesta riippumatta. 3D-kuvissa esitetään Velocity field, ja piirtonauhan paksuus kertoo ilmavirran voimakkuudesta.

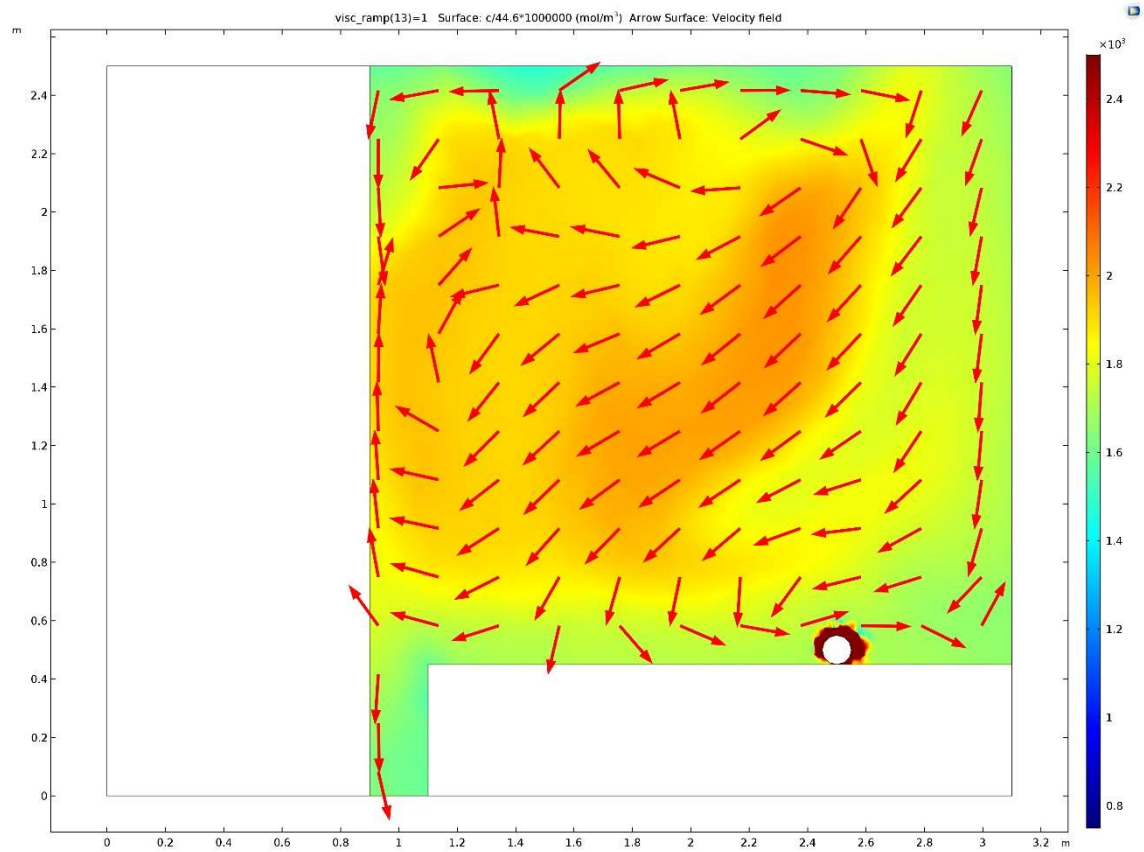
Päätelaite keskellä



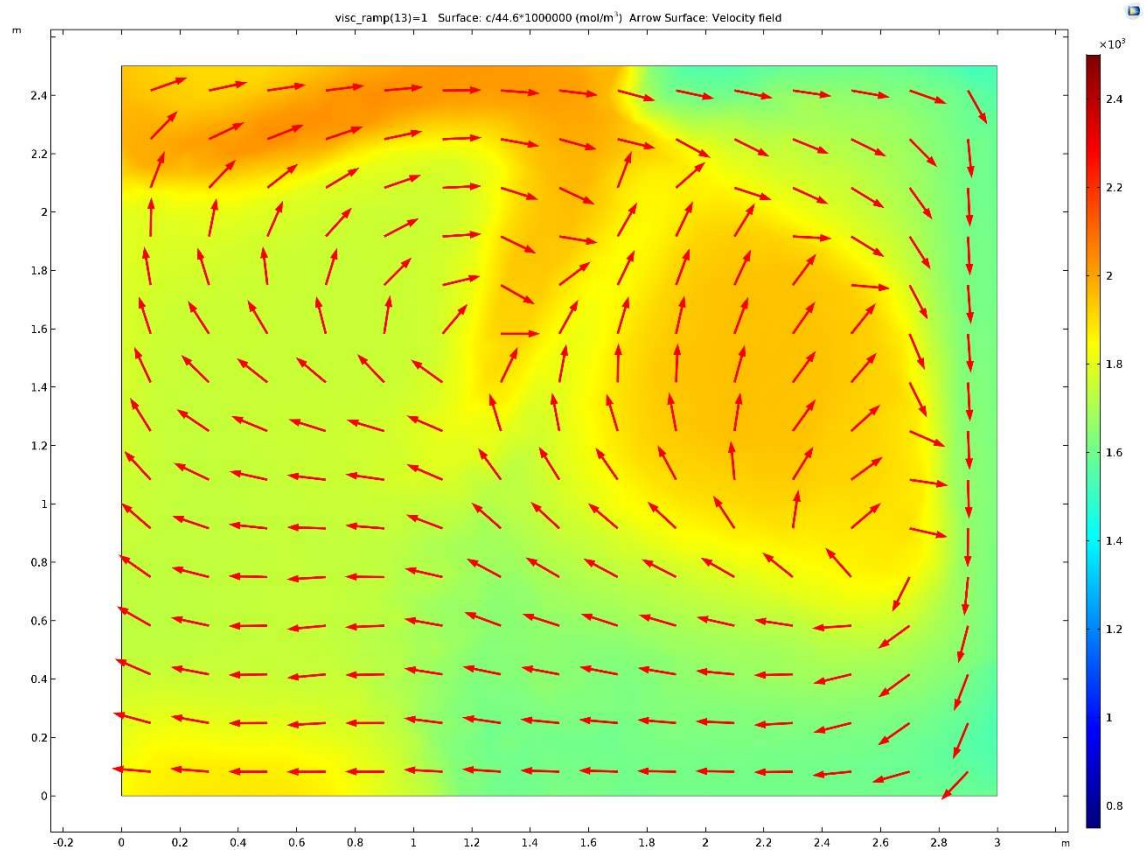
Kuva 1. Velocity sohvanpuoleisesta nurkasta



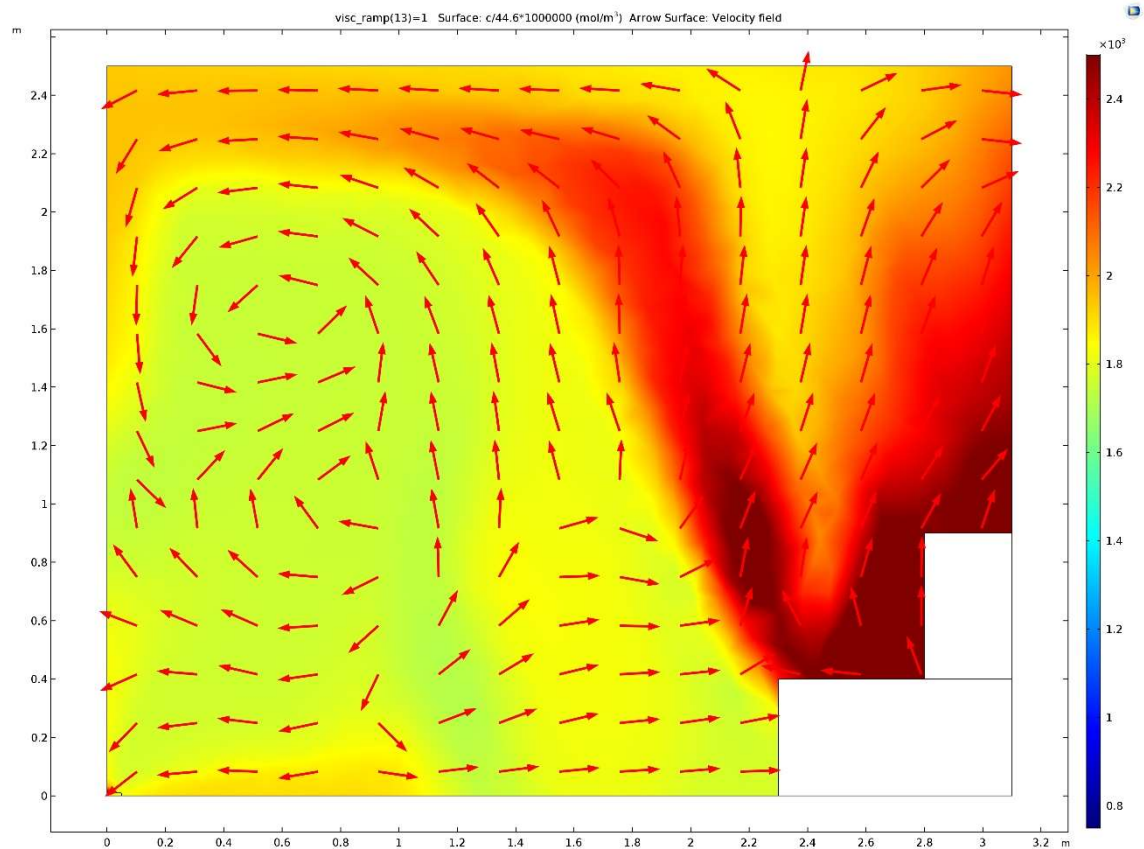
Kuva 2. Velocity kaapinpuoleisesta nurkasta



Kuva 3. Leikkauskuva sängyn keskeltä



Kuva 4. Leikkauskuva sohvän ja sängyn välistä



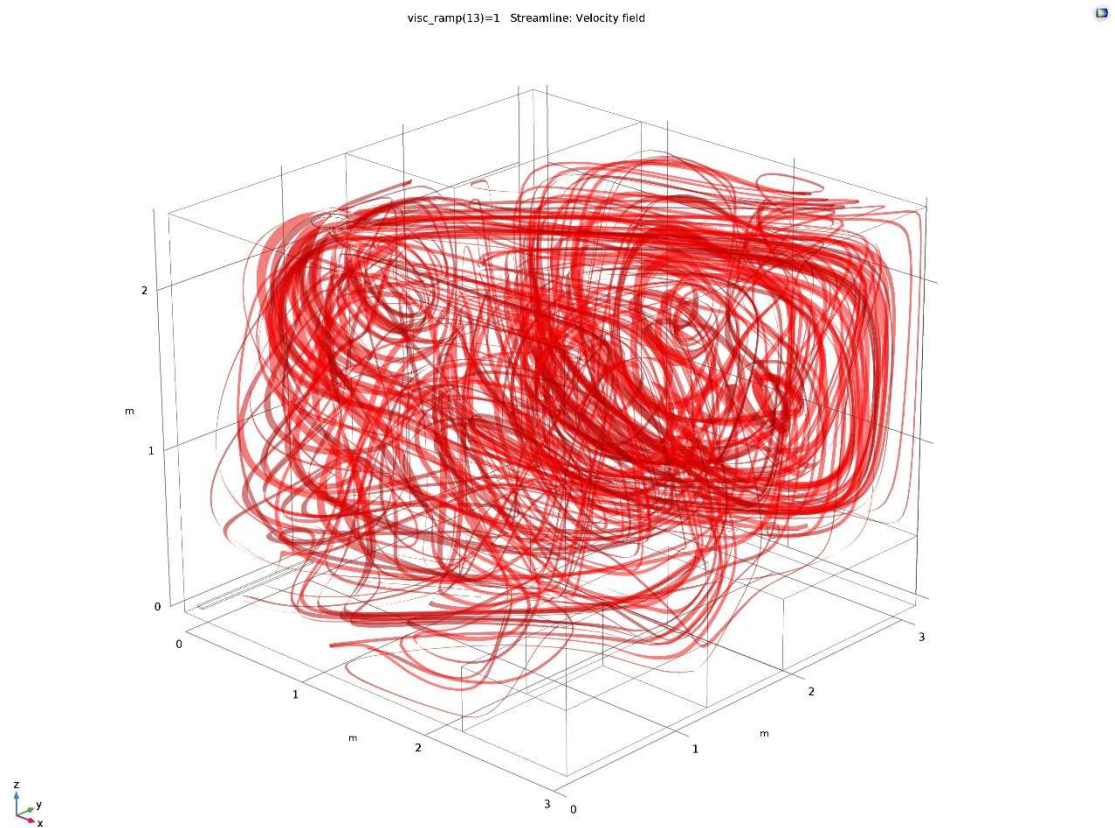
Kuva 5. Leikkauskuva oven keskeltä sohvalle

Evaluation 2D

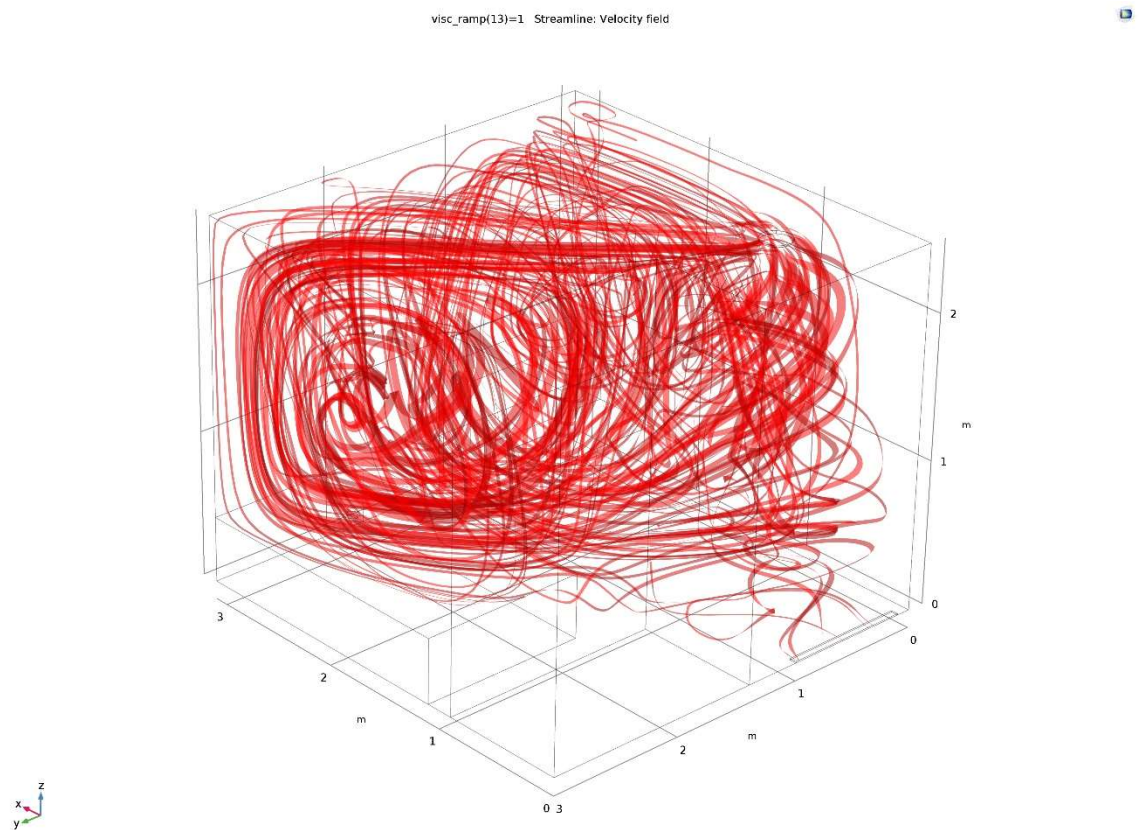
8.85 AUTO 8.5 050 0.89

x	y	Value
2.504323720932007	0.10259422659873962	1592.1937324804796
2.5373425483703613	1.9736634492874146	1760.5628528594766
0.4906444549560547	0.08608478307723999	1849.7860629926213
2.592845916748047	0.5373426675796509	2763.5384180598044
2.8184750080108643	2.0452041625976562	1756.909911491222
2.4937894344329834	0.6639149785041809	1738.6691034668725

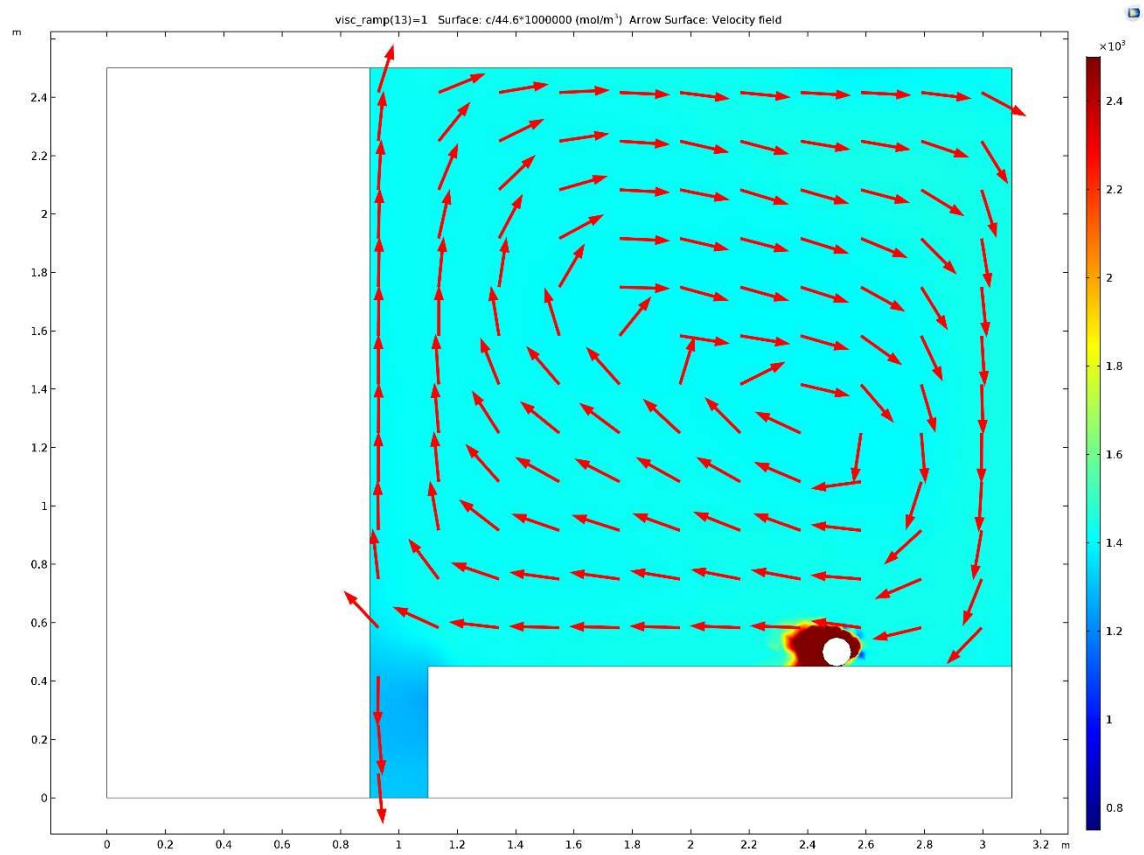
Kuva 6. Laskennan tulokset

Päätelaite oven edessä

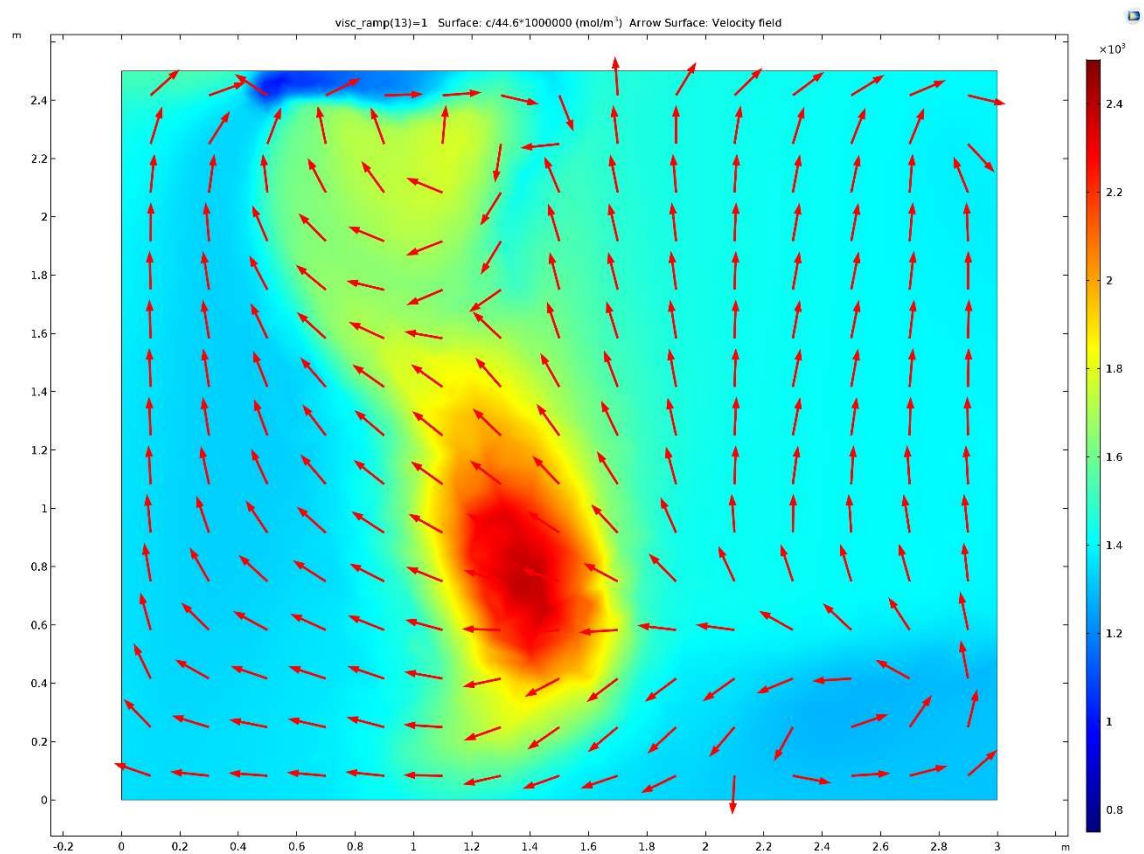
Kuva 7. Velocity sohvanpuoleisesta nurkasta



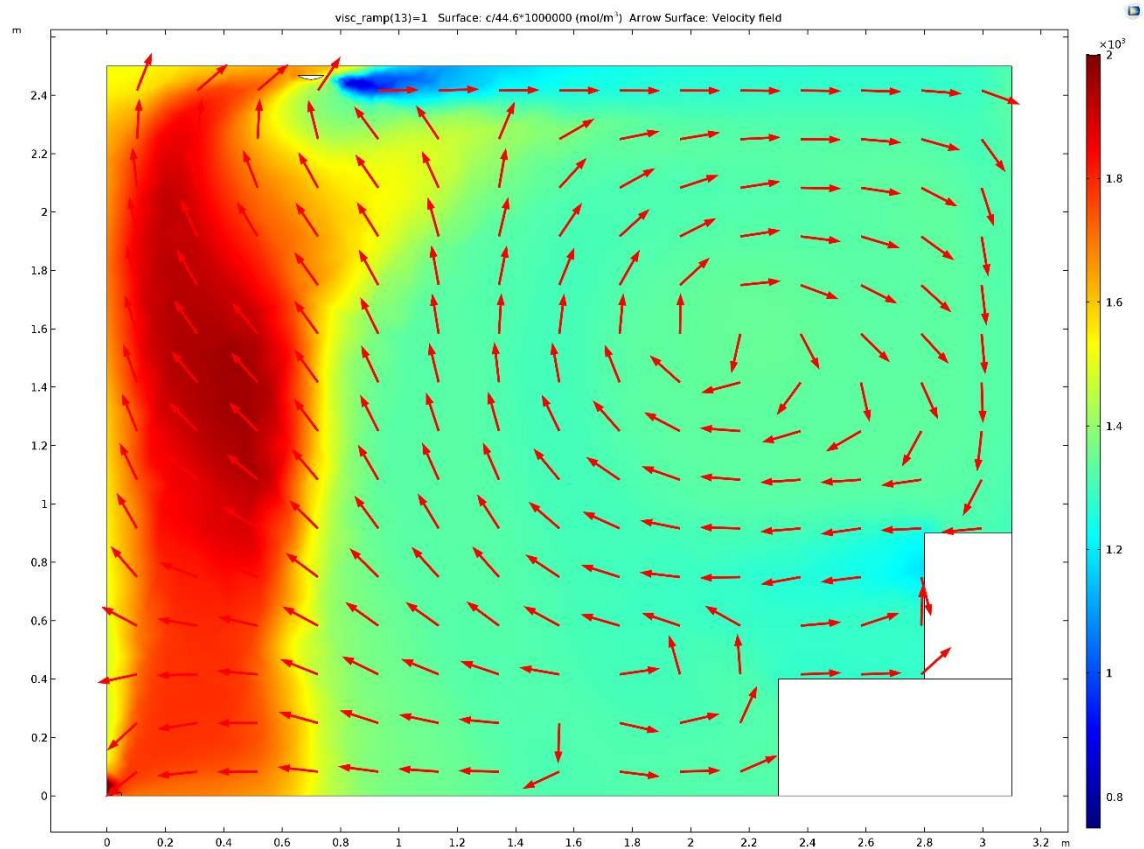
Kuva 8. Velocity kaapinpuoleisesta nurkasta



Kuva 9. Leikkauskuva sängyn keskeltä



Kuva 10. Leikkauskuva sohvän ja sängyn välistä



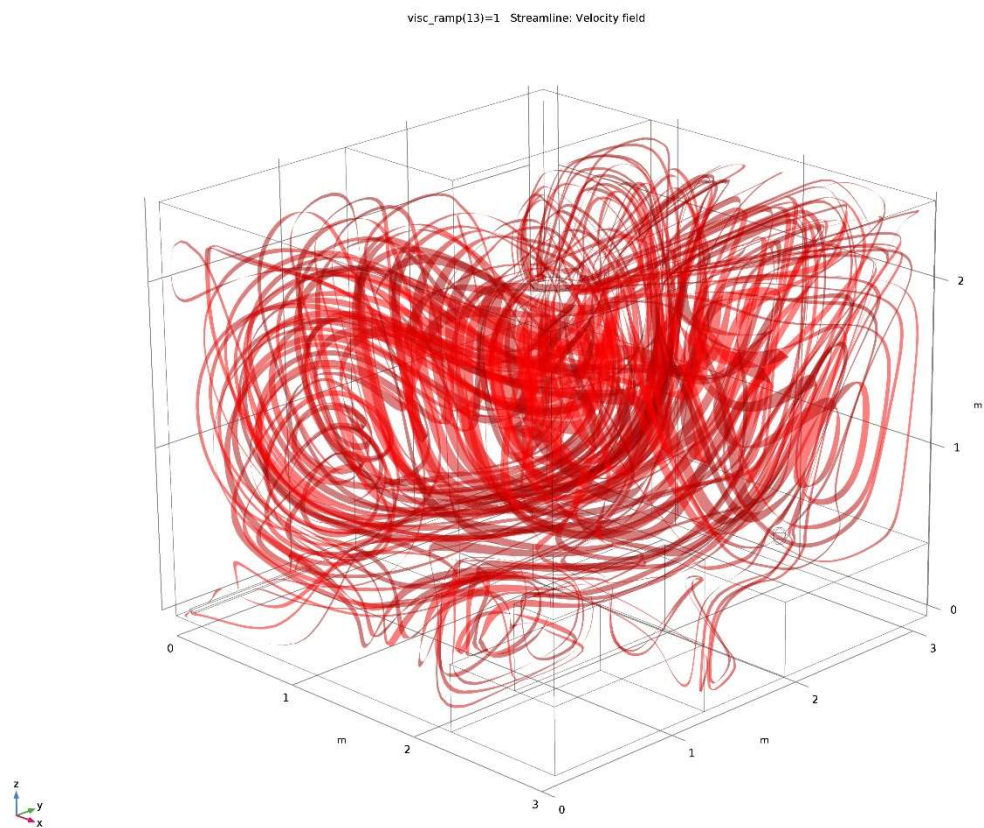
Kuva 11. Leikkauskuva oven keskeltä sohvalle

Evaluation 2D

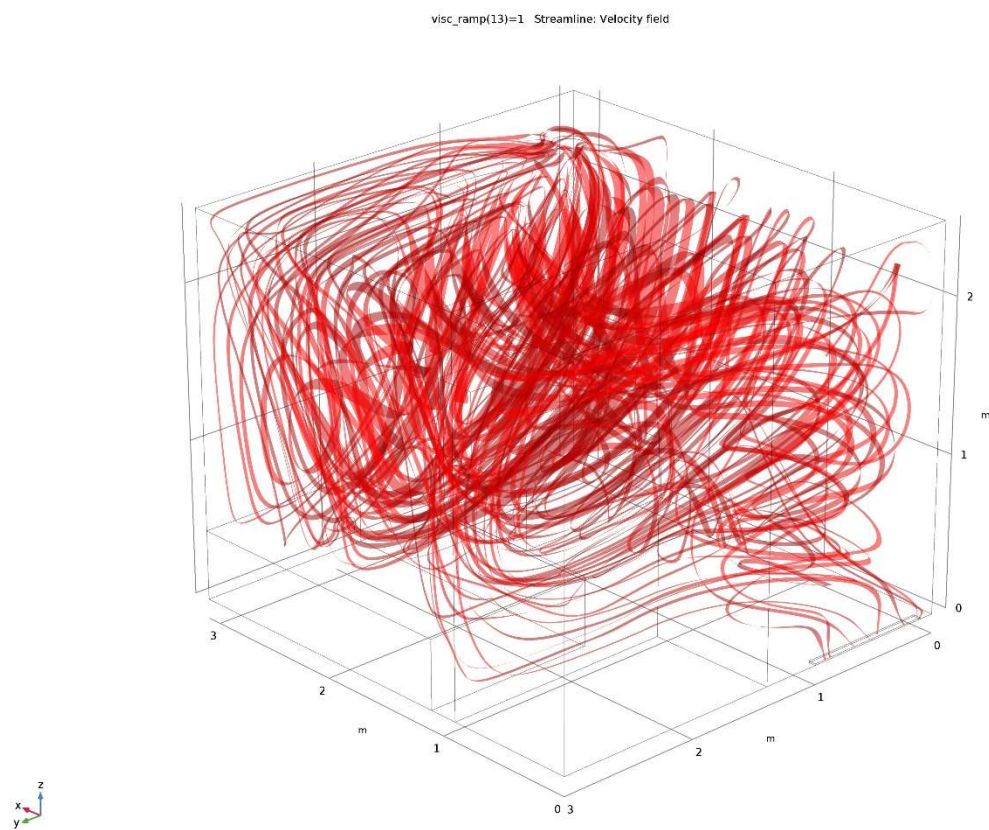
8.89 e-12 AUTO 8.5 e-1 850 e-3 0.85

x	y	Value
2.499720335006714	0.07802006602287292	1301.76510333142
2.499720335006714	1.9605704545974731	1405.4193951295892
0.5441551208496094	0.09263190627098083	1682.4029940918638
2.559112071990967	0.47244811058044434	1277.870272377229
2.8573262691497803	2.0405478477478027	1434.8557135734266
2.4389820098876953	0.6932325959205627	1427.9042156421733

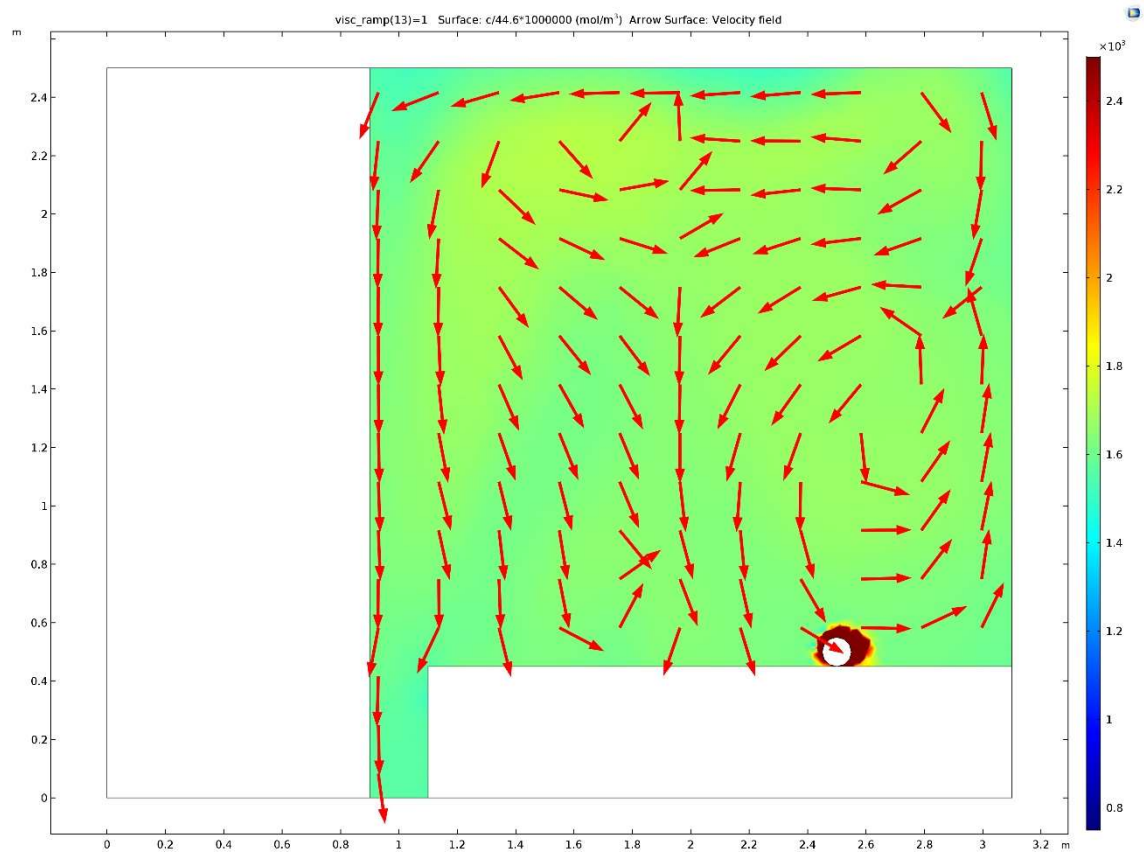
Kuva 12. Mittaustulokset

Päätelaite sohvanpuoleisessa nurkassa

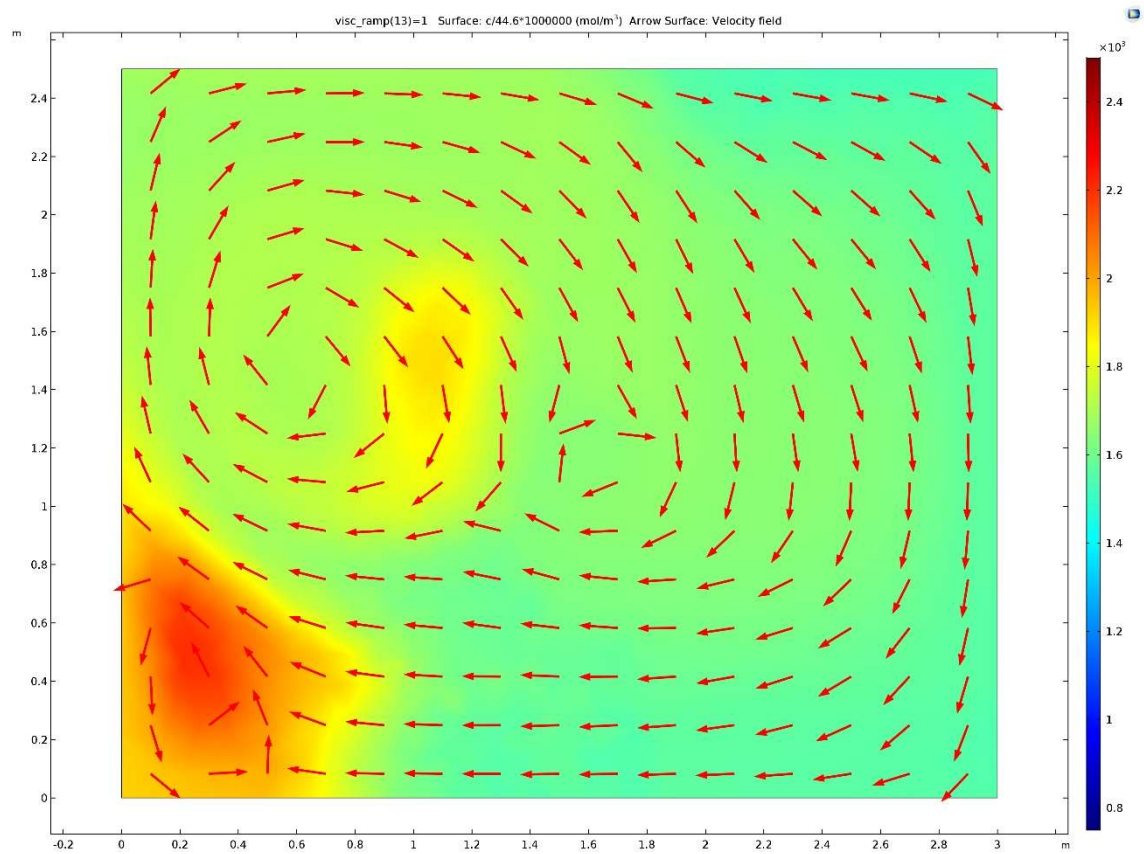
Kuva 13. Velocity sohvanpuoleisesta nurkasta



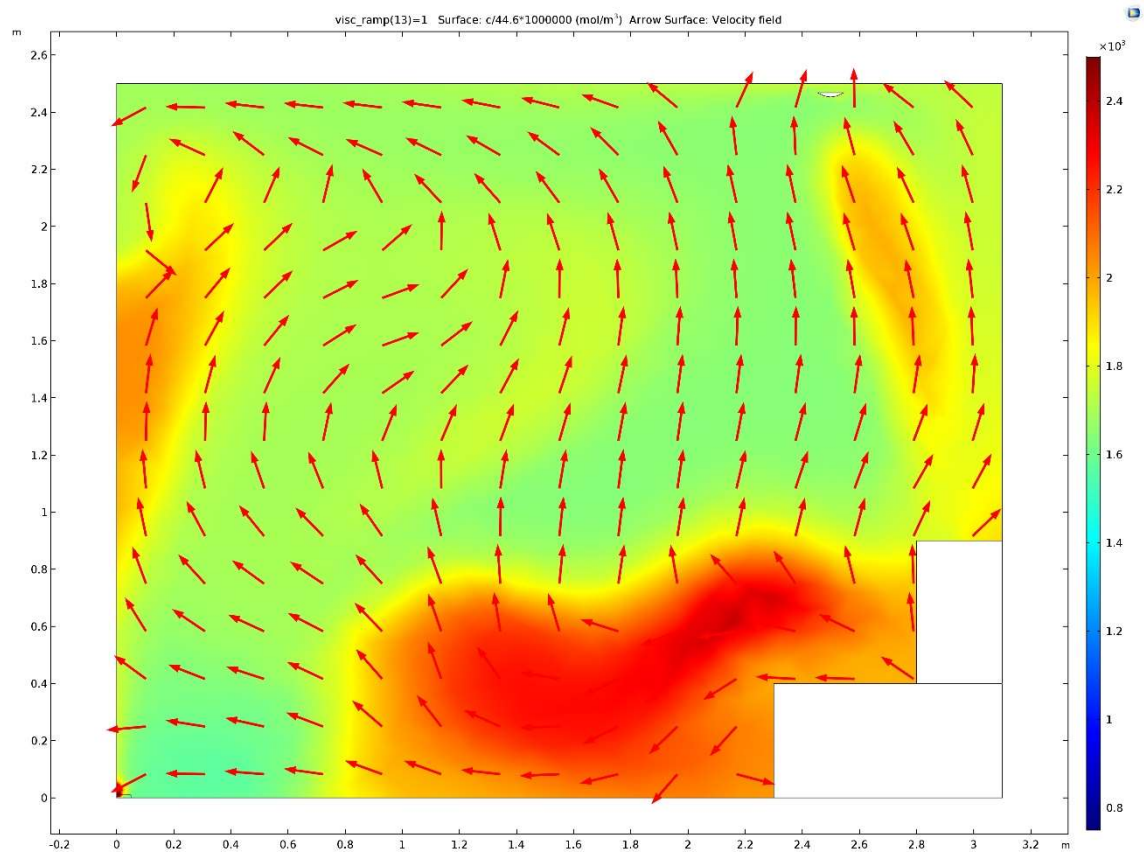
Kuva 14. Velocity kaapinpuoleisesta nurkasta



Kuva 15. Leikkauskuva sängyn keskeltä



Kuva 16. Leikkauskuva sohvän ja sängyn välistä



Kuva 17. Leikkauskuva oven keskeltä sohvalle

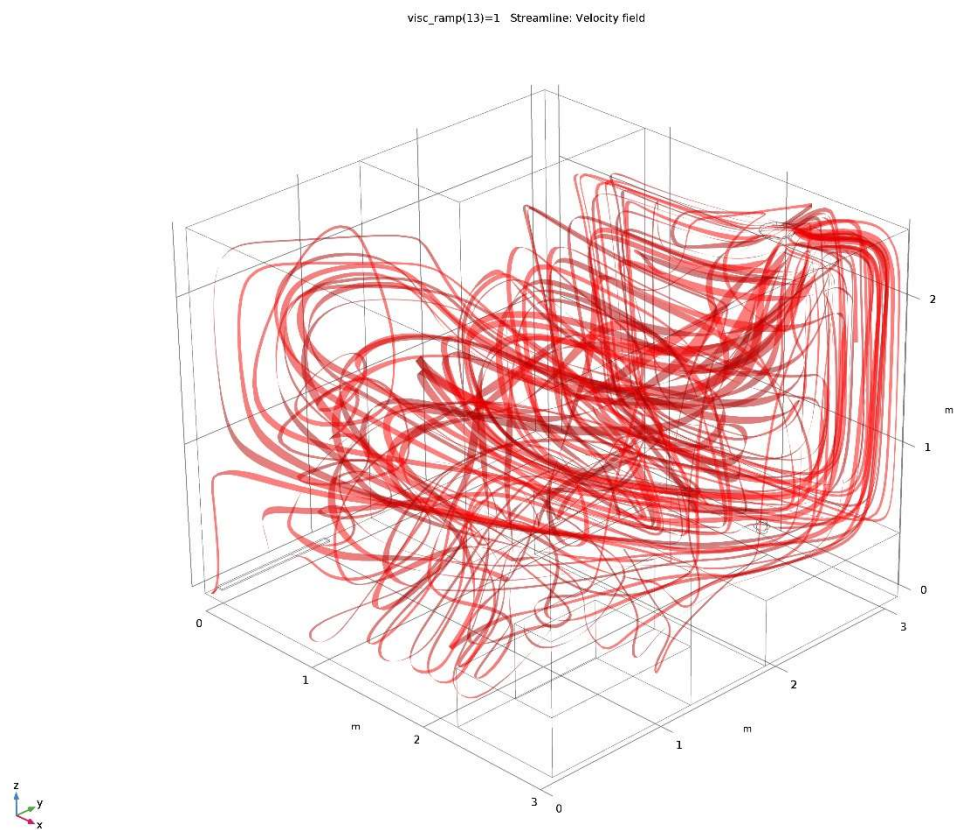
Evaluation 2D

8.85e-12 AUTO 8.5e-1 850e-3 0.85

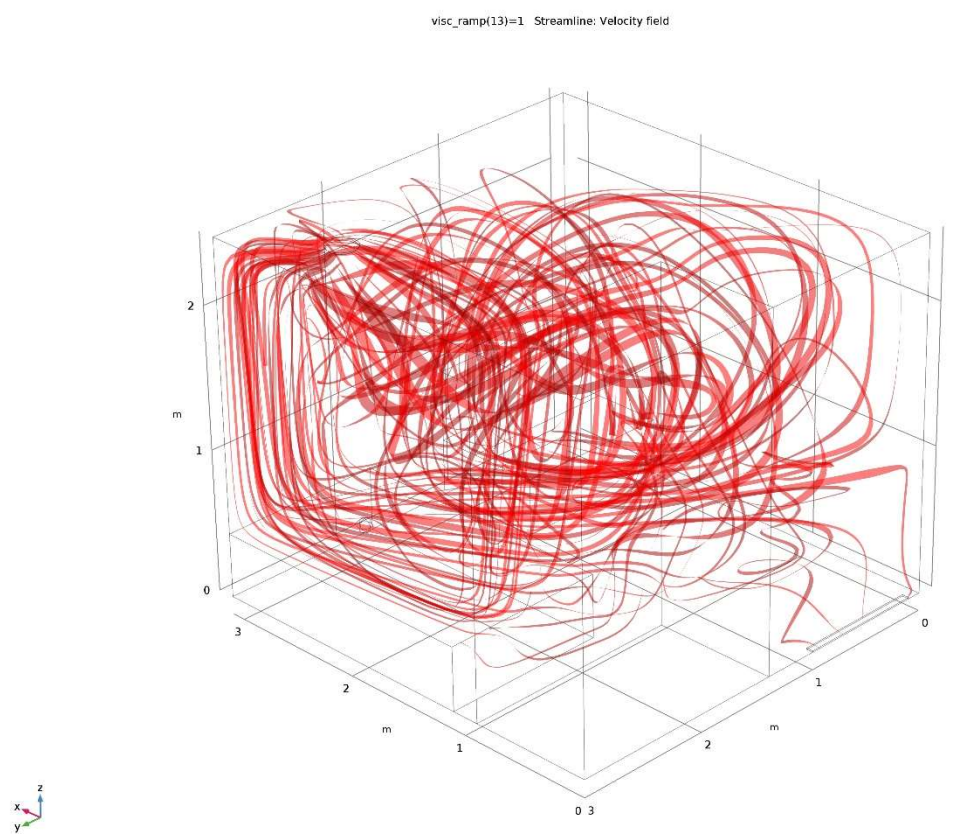
x	y	Value
2.5113885402679443	0.10416680574417114	1553.5699595195183
2.5236105918884277	1.974166750907898	1595.5140934961569
0.5166105031967163	0.10018852353096008	1594.295671007469
2.5833895206451416	0.4998074173927307	1990.3647147365987
2.805833339691162	2.07194447517395	1645.4874293290352
2.463610887527466	0.6725000143051147	1621.4278528250272

Kuva 18. Mittaustulokset

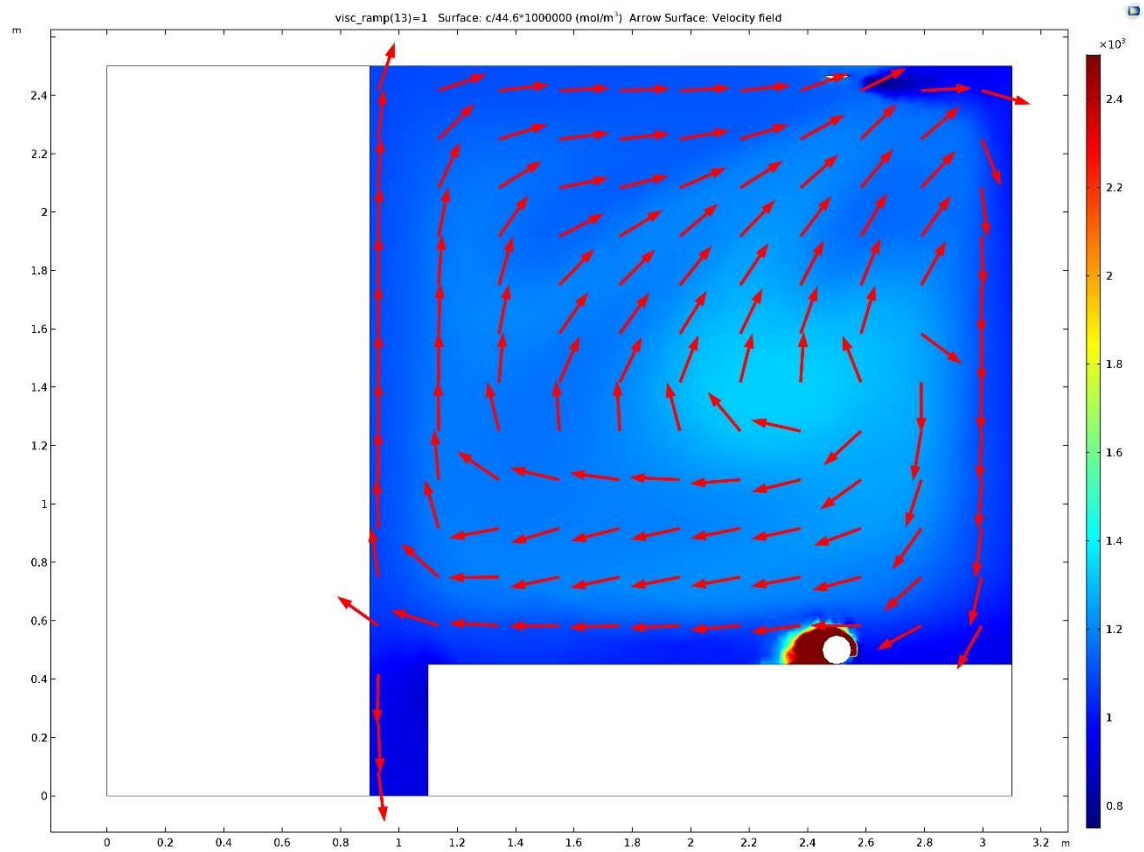
Päätelaite sängynpuoleisessa nurkassa



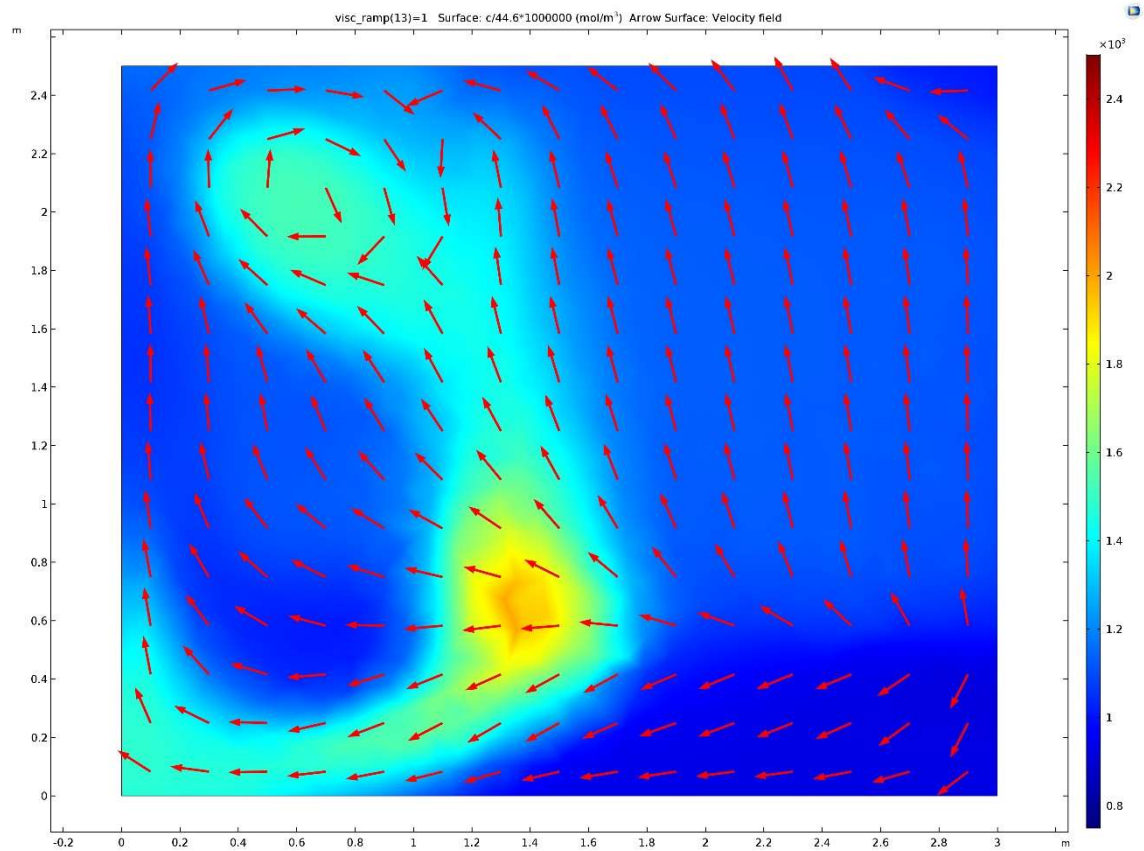
Kuva 19. Velocity sohvanpuoleisesta nurkasta



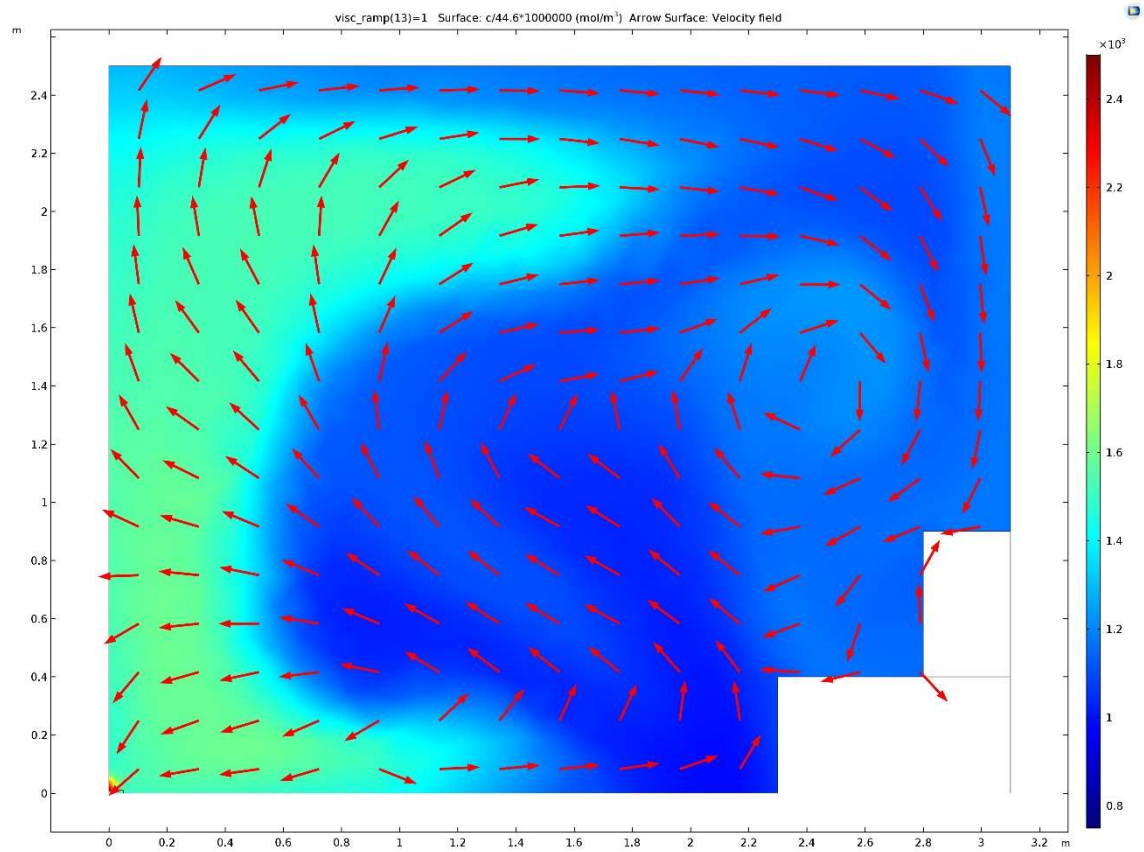
Kuva 20. Velocity kaapinpuoleisesta nurkasta



Kuva 21. Leikkauskuva sängyn keskeltä



Kuva 22. Leikkauskuva sohvän ja sängyn välistä



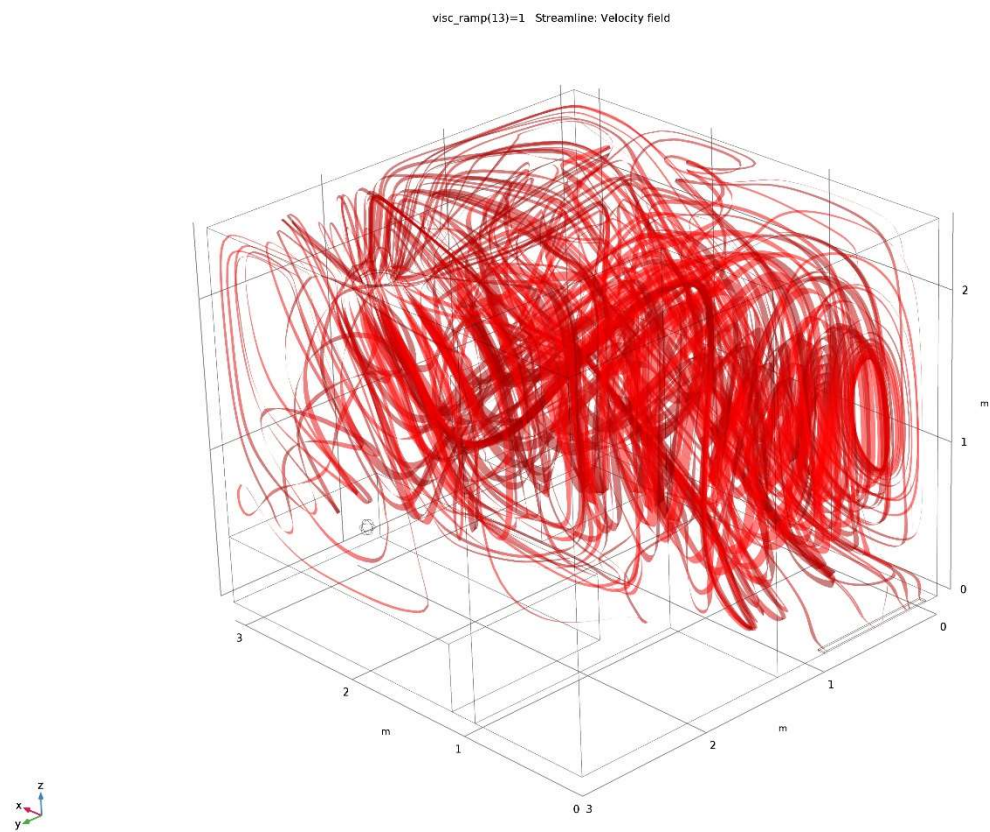
Kuva 23. Leikkauskuva oven keskeltä sohvalle

Evaluation 2D

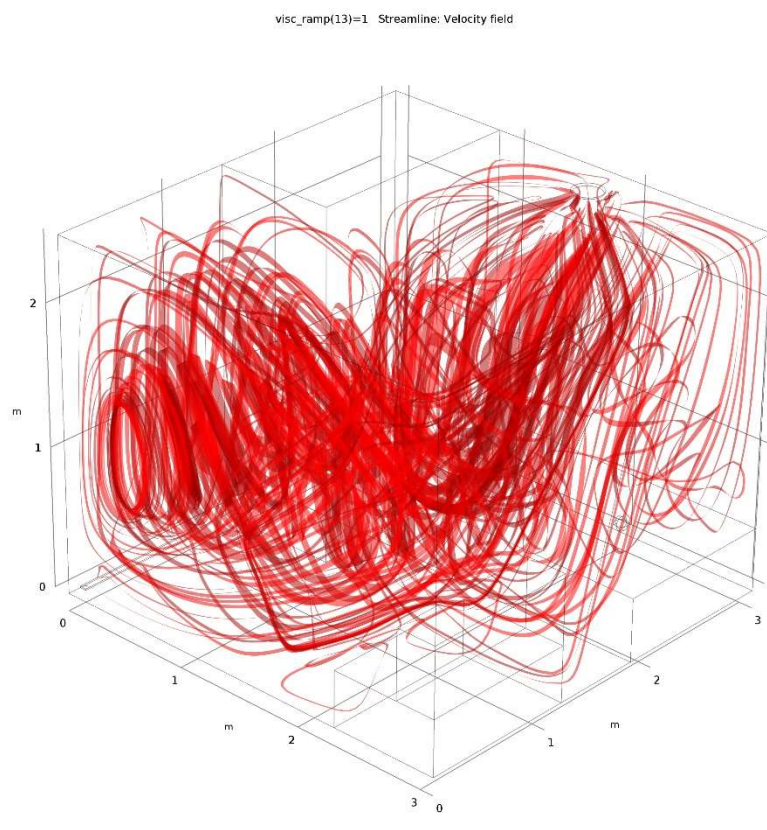
8.85 e-12 AUTO 0.5 e-1 0.50 e-3 0.85

x	y	Value
2.4713048934936523	0.10259422659873962	919.7995613469002
2.482311248779297	1.9571539163589478	1114.5825248529818
0.5136227607727051	0.14898346364498138	1585.8398102953865
2.5517759323120117	0.5080076456069946	1150.6759935653874
2.8349838256835938	2.1167449951171875	1153.4654170714884
2.4332544803619385	0.6694180965423584	1163.9688918983647

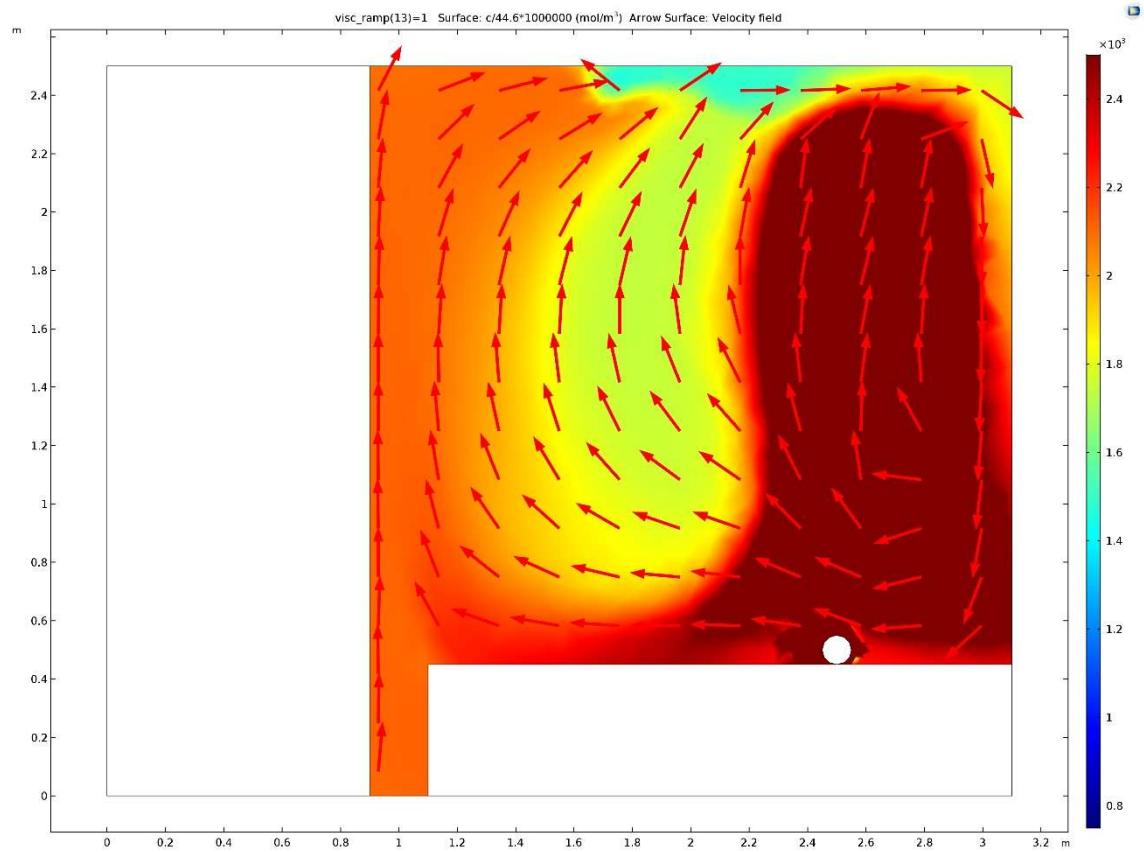
Kuva 24. Mittaustulokset

Päätelaite samassa kohdassa, mutta suuntauslevy toiseen suuntaan

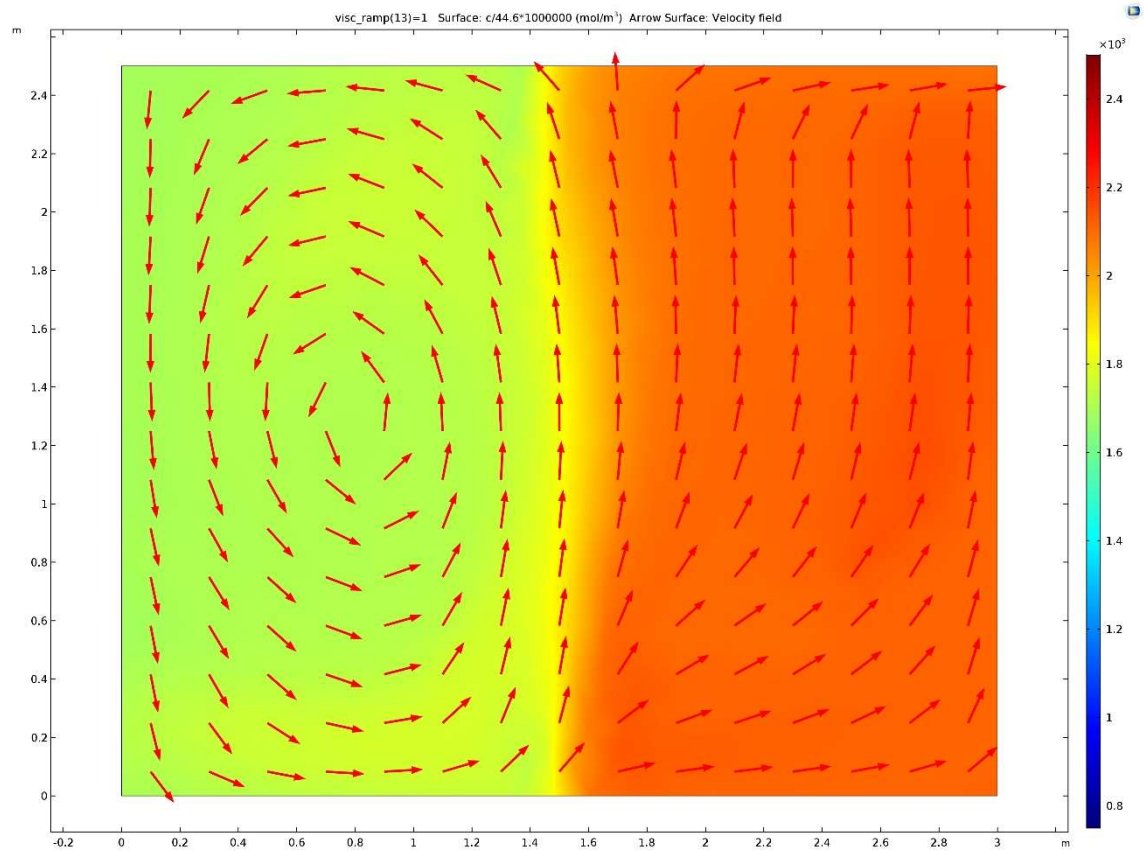
Kuva 25. Velocity sohvanpuoleisesta nurkasta



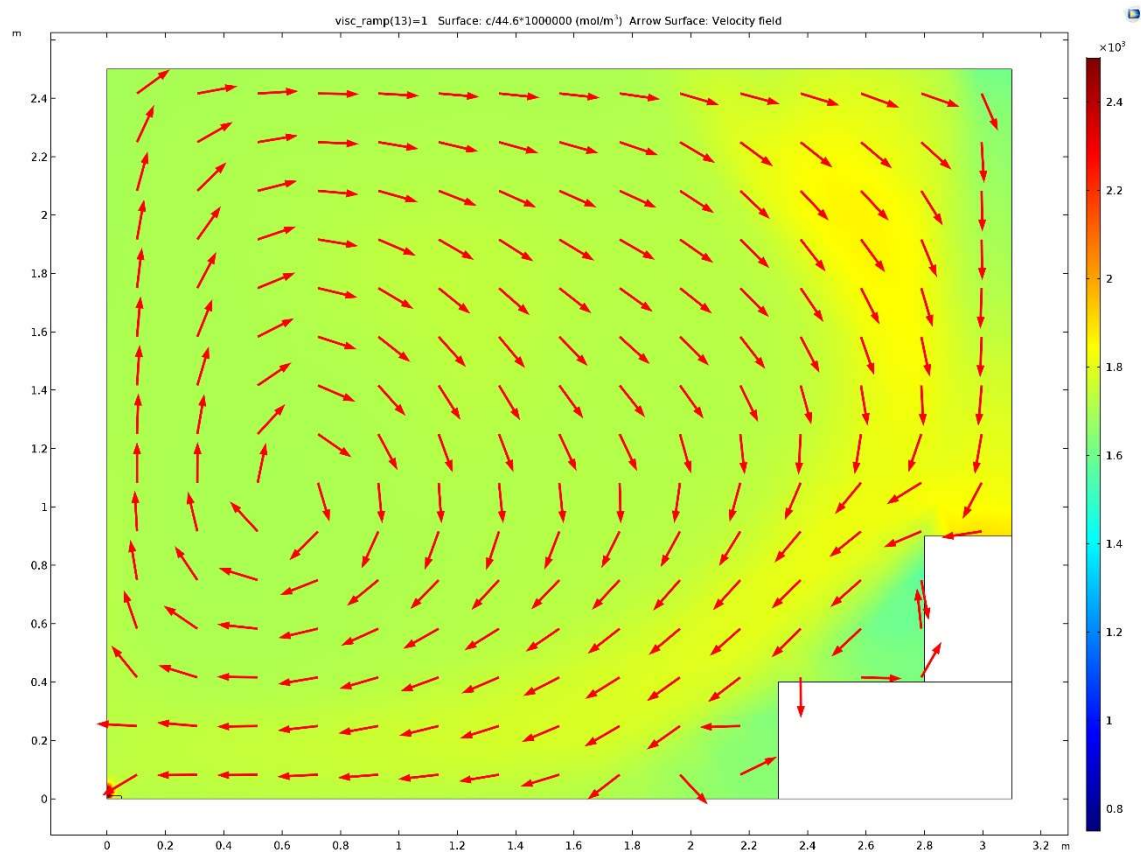
Kuva 26. Velocity kaapinpuoleisesta nurkasta



Kuva 27. Leikkauskuva sängyn keskeltä



Kuva 28. Leikkauskuva sohvän ja sängyn välistä



Kuva 29. Leikkauskuva oven keskeltä sohvalle

Evaluation 2D

8.85 e-12 AUTO 8.5 e-1 850 e-3 0.85

x	y	Value
2.5188426971435547	0.08519110083580017	2102.246607569612
2.501326560974121	1.9185242652893066	2100.9142046394336
0.5194797515869141	0.079352468252182	1732.3047434899674
2.568842887878418	0.493895947933197	1636.102519967024
2.8023886680603027	2.1170380115509033	3377.6770048760486
2.4754245281219482	0.7741507887840271	2956.6779300362596

Kuva 30. Mittaustulokset